

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому
развитию ФГАОУ ВО

«МГТУ им. Н.Э. Баумана»,

директор экономических наук, профессор

Павел Анатольевич Дроговоз

«3» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,

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

Актуальность темы диссертации для науки и практики

Повышение энергетической эффективности радиоэлектронных средств, особенно в условиях возрастающих рабочих частот сигналов и плотности компоновки их конструктивных элементов, остаётся одной из приоритетных задач современной радиотехники. Разработка широко используемых в этой области техники импульсных источников питания с высоким КПД требует не только тщательного подбора активных элементов, но и глубокой проработки конструктивной реализации их основных элементов, к которым относятся силовые трансформаторы и дроссели. В направлении совершенствования их методов исследования и проектирования в России и за рубежом ведутся обширные исследования.

С повышением частоты сигналов, преобразуемых в трансформаторах, особое внимание необходимо уделять потерям энергии, обусловленным скин-эффектом и эффектом близости. Традиционные методы расчёта этих потерь, например, на основе формулы Доуэлла и др., применимы лишь для идеализированных условий и не охватывают весь спектр конструктивных решений, используемых в радиотехнике современных источников питания. В связи с этим, разработка методик, позволяющих с достаточной точностью определять высокочастотные потери в трансформаторах и дросселях, является актуальной, поскольку имеет высокую практическую значимость.

Диссертационное исследование Веретенникова Н.Ю. направлено на решение данной задачи, в нем предложены оригинальные методики

определения потерь в трансформаторах, учитывающие сложную топологию их обмоток, режимы работы поочерёдного протекания токов различной формы. В отличие от известных, предложенные автором методики определения потерь в трансформаторах объединяют хорошо известные специалистам преимущества аналитических и численных методов расчета и представлены в удобном для практического использования виде. Это определяет высокую научную и прикладную ценность диссертации Веретенникова Н. Ю.

Краткое содержание диссертационной работы:

Рукопись диссертации с учетом приложений содержит 126 страниц и включает введение, 4 главы (раздела), заключение, список литературы и 2 приложения (акты внедрения результатов и свидетельства о регистрации программного обеспечения). Работа снабжена необходимыми иллюстрациями, описаниями алгоритмов, расчётами и экспериментальными результатами.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, дана характеристика объекту и предмету исследования, отражена степень разработанности темы, указаны научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена теоретическому анализу известных методов расчета высокочастотных потерь в трансформаторах, описанию скин-эффекта, эффекта близости и существующих аналитических подходов к их учету и обоснованию их недостатков.

Глава 2 посвящена разработке усовершенствованных методик расчета потерь, включая расчет поля, создаваемого обмотками трансформаторов с чередующимися слоями и поочередным протеканием токов. Приведены аналитические соотношения, позволяющие адекватно учитывать форму тока и топологию обмотки, а также примеры их использования.

Глава 3 содержит реализацию предложенных автором методик в виде программных модулей, а также примеры расчета мощности, рассеиваемой в обмотках при их различных конфигурациях. Проведен анализ влияния конструкции обмоток трансформатора на величину потерь мощности, что позволяет формализованно выбирать наиболее эффективную топологию намотки.

Глава 4 посвящена экспериментальной верификации предложенных подходов, включает описание испытательных стендов, методик проведения измерений и их сравнение с результатами моделирования (в том числе в Ansys Maxwell). Представлены результаты, подтверждающие достоверность проведения расчетов потерь в трансформаторах с использованием предложенных автором методик.

В заключении представлены в обобщенном виде результаты проведенных исследований и сформулированы выводы, подтверждающие решение всех поставленных автором в диссертации задач.

В приложениях представлены 4 акта внедрения результатов

диссертационного исследования на трех предприятиях и в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ», а также свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из которых 4 — в изданиях из перечня ВАК, 7 — в сборниках трудов конференций, 3 из которых проиндексированы в базе Scopus. Зарегистрированы две программы для ЭВМ.

Стиль изложения материалов диссертации и автореферата отвечает требованиям научно-технических изданий. Их содержание в полной мере раскрывает постановку и методы проведенных исследований, а также обосновывает результаты решений всех сформулированных задач. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена согласованностью результатов моделирования по предложенным автором методикам с результатами численного моделирования и результатами экспериментальных измерений, выполненных на различных макетах реальных преобразователей.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна исследования состоит в том, что:

- Разработана методика моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов, учитывающая чередующиеся обмотки и токи произвольной формы;

- Предложен способ аппроксимации эффекта близости через эквивалентную схему, обеспечивающий высокую точность (погрешность <1 %) и пригодный для моделирования во временной области с использованием SPICE-совместимых симуляторов.;

- Разработана методика расчета потерь в витках магнитных компонентов при поочередном протекании тока, характерном для обратноходовых преобразователей.

Новизна результатов, выводов и рекомендаций диссертации состоит в том, что новые решения, основанные на предложенных в диссертации подходах, позволяют проводить оценку потерь и оптимизировать топологию трансформаторов и дросселей до этапа их численного моделирования, тем самым повышая скорость разработки радиоэлектронных устройств.

Значимость для науки и производства, полученных автором диссертации результатов состоит в возможности применения разработанных методик на стадии эскизного проектирования радиоэлектронных устройств. Программы, созданные автором, позволяют значительно упростить процесс выбора оптимальной структуры обмотки трансформатора, а также обеспечить точную оценку потерь без необходимости итеративного моделирования в трудоемких САПР-системах. Внедрение полученных результатов позволит сократить время разработки

изделий за счёт предварительной оценки потерь без расширенного численного моделирования, а также снизить стоимость разработки за счёт уменьшения количества итераций в САПР. Считаем целесообразным продолжить работу в направлении адаптации предложенных автором способов определения потерь в трансформаторах на смежные области их применения, в частности в силовых инверторах тяговых электроприводов и т.п.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты работы целесообразно использовать проектными организациями на ранних этапах разработки источников питания и других преобразовательных устройств для предварительной оценки тепловых потерь, что ускоряет цикл проектирования и повышает точность инженерных решений. Разработанные автором модели и полученные с их применением результаты могут быть использованы в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ по соответствующим специальностям электротехнического профиля.

Замечания по диссертационной работе:

1. В главе, посвящённой экспериментальным исследованиям, стоило бы более чётко сформулировать допущения и дать оценку погрешностям измерений, особенно касающимся методов оценки потерь (например, не указана точность тепловизора, допуски по температуре, и т.д.).

2. Раздел, посвящённый программной реализации предложений автора, требует более подробного изложения функциональных возможностей разработанного программного обеспечения, включая описание пользовательского интерфейса, поддерживаемых форматов входных данных, алгоритмов расчёта и режимов работы. Кроме того, было бы полезно указать границы применимости программы — например, ограничения по геометрии магнитных компонентов или по типам преобразовательных топологий, для которых она предназначена.

3. В диссертации не приведены примеры применения методики к планарным трансформаторам, что, при растущем интересе к таким их конструкциям в современной силовой электронике, дополнительно расширило бы практическую важность результатов диссертации.

4. В тексте диссертации встречаются стилистические и пунктуационные неточности, не влияющие на понимание сути материала.

5. В ряде формул отсутствуют номера, что затрудняет их последующее цитирование в тексте.

Приведенные замечания не снижают научно-практическую ценность диссертационного исследования, а являются рекомендациями для дальнейших исследований в этой области и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Веретенникова Николая Юрьевича «Методика моделирования высокочастотных потерь в импульсных источниках питания» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладающей значительной научной новизной и высокой практической значимостью. В ней изложены оригинальные научно обоснованные решения в области моделирования высокочастотных потерь в магнитных компонентах импульсных источников питания.

Полученные научные и практические результаты в области оценки потерь трансформаторов и дросселей обладают новизной, высокой степенью достоверности, апробированы и внедрены. Автор продемонстрировал высокий уровень подготовки, умение формулировать научную задачу, проводить аналитические расчеты, разрабатывать прикладные инструменты и выполнять экспериментальную верификацию.

Содержание и уровень выполнения диссертационной работы соответствуют требованиям Положения о присуждении ученых степеней пп.9-14, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Работа соответствует паспорту специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

На основании вышеизложенного можно заключить, что Веретенников Николай Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Электротехника и промышленная электроника» ФГАОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, протокол № 10 от «02» июля 2025 г.

Заведующий кафедрой
Электротехники и
промышленной электроники,
доктор технических наук,
профессор

 Красовский Александр Борисович

Доцент кафедры Электротехники и
промышленной электроники,
кандидат технических наук

 Снитько Ирина Сергеевна

Адрес местонахождения образовательной организации: 105005,
Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5;

Контактные данные лица, подготовившего отзыв: телефон:
8(960)5  snitko@bmstu.ru

А.Б. и Снитько И.С. заверяю _____