

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.09.2025 № 51

О присуждении Веретенникову Николаю Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методика моделирования высокочастотных потерь в импульсных источниках питания» по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения **принята к защите** 26.06.2025 (протокол заседания № 50) **диссертационным советом** 24.2.286.03, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84 (приказ о создании диссертационного совета от 26.01.2018 № 86/нк).

Соискатель Веретенников Николай Юрьевич, 29 ноября 1995 года рождения, в 2020 году **окончил** магистратуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика». В 2024 году **окончил** аспирантуру ФГБОУ ВО «ВГТУ» по программе подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи. **Работает** инженером отдела схемотехники в ООО «АЕДОН» (г. Воронеж).

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Башкиров Алексей Викторович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры.

Официальные оппоненты:

- Битюков Владимир Ксенофонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»;

- Тихонов Андрей Ильич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» в своем положительном отзыве, подписанном д.т.н., профессором, заведующим кафедрой Электротехники и промышленной электроники Красовским Александром Борисовичем и к.т.н., доцентом кафедры Электротехники и промышленной электроники Снитько Ириной Сергеевной, и утвержденном доктором экономических наук, профессором, проректором по науке и цифровому развитию Дрогозовом Павлом Анатольевичем, указала, что диссертация Веретенникова Николая Юрьевича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи – разработки методик, позволяющих с достаточной точностью определять высокочастотные потери в трансформаторах и дросселях. Материалы автореферата соответствуют основным положениям диссертации, правильно и достаточно полно передают её содержание и полученные результаты. Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 14, 16 паспорта специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. По объёму выполненных исследований, научной и практической новизне, оформлению и практической ценности работа соответствует требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Веретенников Николай Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 7 тезисов в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций (три включены в базу данных Scopus). Имеется 2 зарегистрированные программы для ЭВМ. Общий объём публикаций по теме диссертации – 6,39 печ. листа, в числе которых 4,2 печ. листа принадлежит

соискателю. В работах, опубликованных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: методики расчета и моделирования потерь в витках магнитных компонентов с чередующимися обмотками и магнитных компонентов с поочередно протекающими токами в обмотках; обоснование выбора математического аппарата, используемого для моделирования потерь в трансформаторах с произвольной конфигурацией поля на границах слоев обмоток; алгоритм поиска номиналов компонентов для аппроксимации эффекта близости во временной области; обоснование методики проведения эксперимента, экспериментальная верификация результатов моделирования и сравнение традиционных методов численного моделирования с предложенными аналитическими методиками.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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 обратноходовых 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.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Александрова И.В., к.т.н., доцента кафедры электроники и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Новосибирский государственный технический университет», отзыв

положительный, замечания: 1) Из текста автореферата непонятна конструкция и внешний вид исследуемых дросселя и трансформатора: в не указан магнитный материал, число витков и другие параметры, не приведена фотография / чертеж; 2) Результаты исследования численно проверены только для одной конструкции дросселя/трансформатора и в одной рабочей точке. Принимая во внимание потенциально высокую погрешность принятой схемы косвенных измерений, в том числе связанную с оценочным характером самой формулы Штейнметца и с неотъемлемым разбросом параметров магнитных сердечников, гораздо убедительнее было бы провести эксперименты в нескольких рабочих точках и на двух-трех сердечниках от разных производителей. Например, используя аналогичный по размеру сердечник от TDK из материала N49 или более подходящего. Несмотря на трудоёмкость, такой подход принято считать нормой в подобных исследованиях, позволяющей укрепить обоснованность выводов.

2. Пиганова М.Н., д.т.н., профессора, профессора кафедры радиоэлектронных систем ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», отзыв положительный, замечания: 1) Отсутствие анализа влияния материала сердечника и зазора. Как отмечено в тексте, влияние зазора сердечника на распределение магнитного поля и, соответственно, на высокочастотные потери, является важным фактором. Однако этот вопрос остался недостаточно проработанным. 2) Хотя автор заявляет о применимости разработанных методик к различным типам импульсных источников питания, в работе не рассматриваются многофазные топологии, где распределение токов и потерь может существенно отличаться приведённых примеров. Дополнительные исследования в этом направлении могли бы расширить сферу применения предложенных подходов.

3. Дыбко М.А., к.т.н., доцента кафедры Электроники и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Кучака С.В., доцента кафедры Электроники и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», отзыв положительный, замечания: 1) Из описания алгоритма методики расчета и минимизации потерь в магнитных элементах не ясно, подходит ли она для трансформаторов планарного и интегрального исполнения, что свойственно современным источникам вторичного питания и преобразователям, работающим на высоких частотах. 2) Из описания экспериментальной верификации расчета потерь не понятно на какой частоте работал преобразователь. 3) Не описан

вариант с чередованием обмоток P-S-P-S. Не будет ли он иметь преимущества? 4) Ошибка в нумерации формул - две формулы 4.

4. Муромцева Д.Ю., д.т.н., профессора, проректора по научной работе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Пудовкина А. П., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Радиотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ», отзыв положительный, замечания: 1) Сравнительный анализ с другими методами расчета потерь, включая методы на базе машинного обучения или гибридные подходы (например, FEM-анализ с предварительным обучением моделей), в работе не представлен. Хотя это и не является целью диссертационного исследования, краткий обзор таких направлений помог бы лучше позиционировать предложенные решения в современном контексте. 2) Методика апробирована на ограниченном наборе топологий (например, P-P-S-S и P-S-S-P), в основном в рамках обратногоходового и понижающего преобразователей. Не рассматриваются другие распространенные архитектуры (двухтактные, резонансные, push-pull и др.), что ограничивает универсальность предлагаемого подхода.

5. Кривина Д.Н., к.т.н., доцента, заведующего кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), отзыв положительный, замечания: 1) Отсутствует апробация методики для планарных трансформаторов, что ограничивает универсальность предлагаемого подхода. 2) Отсутствует количественная оценка влияния воздушного зазора в сердечнике на распределение магнитного поля и, соответственно, на потери в обмотках. Также не учтено влияние насыщения материала магнитопровода. 3) В аспекте практического внедрения, несмотря на то, что в автореферате упоминаются разработанные программы для ЭВМ, в нём не приведена информация о степени удобства их использования, требованиях к вычислительным ресурсам пользователя и, что наиболее важно, о сравнении трудоемкости работы с предлагаемым инструментарием по сравнению с существующими САПР. 4) Тезис о существенном сокращении времени (из первого положения, выносимого на защиту) требует более конкретного количественного подтверждения.

6. Гладких А.А., д.т.н., профессора, профессора кафедры радиотехника, телекоммуникации и защита информации ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», отзыв положительный, замечания: 1) Требуется более глубокая детализация этапов расчета коэффициентов напряженности поля на границах обмоток для полноценного понимания механизма взаимодействия полей и внести ясность в определение критериев оптимального распределения слоев обмоток. 2) Одним из ключевых моментов работы является

сокращение временных ресурсов, необходимых для проектирования и моделирования в предметной области и предложенные подходы позволяют минимизировать количество операций моделирования, однако из автореферата не ясно, насколько в количественном отношении сокращается общее время разработки продукта поскольку в выводах отсутствуют такие показатели. 3) Одним из заявленных приоритетов работы является снижение производственных расходов, желательно провести расчет экономической выгоды от применения предложенных методов и сравнить полученные результаты с аналогичными показателями в традиционных технологиях. 4) Методика верификации, основанная на сравнении экспериментальных данных и результатов моделирования, выглядит убедительно. Однако степень применимости разработанных алгоритмов для широкого спектра реальных приложений нуждается в дополнительном анализе. Оценка возможности масштабируемости предложенных решений и их совместимость с промышленными стандартами проектирования в работе отсутствует.

7. Тычкова А.Ю., д.т.н., доцента, заведующего кафедрой «Радиотехника и радиоэлектронные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет», отзыв положительный, замечания: 1) Метод косвенного определения потерь в обмотках через вычитание других видов потерь из общего теплового баланса схемы подвержен накоплению погрешностей. В диссертации не представлена обобщённая оценка совокупной погрешности при таком подходе, что ограничивает достоверность приведённых численных результатов. 2) В ряде разделов наблюдается упрощённый вывод ключевых формул, особенно при переходе от уравнений поля к расчётам рассеиваемой мощности. Некоторые выражения требуют большего объяснения физического смысла и размерностного анализа.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой компетентностью в области моделирования электромагнитных процессов в трансформаторах, а также проектирования импульсных источниках питания, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, а также — их согласием.

Выбор ведущей организации обоснован ее широкой известностью своими достижениями в области проектирования импульсных источников питания, и моделирования высокочастотных трансформаторов и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также ее согласием; направление научно-исследовательской деятельности структурного подразделения (кафедра электротехники и промышленной электроники) соответствует теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: методика расчета и моделирования высокочастотных потерь в витках магнитных компонентов с чередующимися обмотками при протекании токов произвольной формы, обеспечивающая аналитическое определение потерь в трансформаторах с произвольной конфигурацией поля на границах слоев; методика расчета и моделирования потерь в обмотках магнитных компонентов с поочередно протекающими токами, позволяющая оценивать эффективность различных топологий трансформаторов и выбирать оптимальную толщину проводников до проведения численного моделирования; методика аппроксимации эффекта близости во временной области с использованием метода эквивалентной схемы, позволяющая аппроксимировать зависимость сопротивления обмотки от частоты с заданной точностью; программные реализации указанных методик, позволяющие существенно сократить время и трудоемкость проектирования импульсных источников питания при сохранении требуемой точности.

предложено: применять чередование обмоток в магнитных компонентах как способ снижения влияния эффекта близости и уменьшения суммарных потерь при передаче энергии; использовать алгоритм аппроксимации зависимости сопротивления от частоты в виде эквивалентной схемы для моделирования высокочастотных потерь во временной области без разложения токов на гармоники; включать разработанные методики расчета и моделирования потерь в состав инженерных расчетов при проектировании и оптимизации трансформаторов и дросселей импульсных источников питания, что позволяет повысить их энергетическую эффективность.

доказана перспективность применения аналитических методик для моделирования высокочастотных потерь в магнитных компонентах различных топологий, что позволяет существенно снизить время моделирования за счет отказа от применения анализа с использованием метода конечных элементов на этапе выбора оптимальной конструкции трансформаторов и дросселей. При этом отклонение результатов от экспериментальных данных не превышает 16 %, что подтверждает адекватность предложенных подходов.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:

доказана эффективность разработанных методик моделирования высокочастотных потерь, позволяющих обеспечить адекватное описание процессов в магнитных компонентах при произвольной форме токов и различных топологиях обмоток. Показано, что чередование обмоток в трансформаторах способно существенно снизить потери, вызываемые эффектом близости, как для

трансформаторов с одновременно протекающими токами, так и для магнитных компонентов с поочередно протекающими токами в обмотках, что расширяет теоретические представления о влиянии конструктивных решений на энергетическую эффективность импульсных источников питания.

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы основные принципы электродинамики, теория цепей и математического моделирования, а также численные методы анализа в составе апробированных специализированных САПР, а также экспериментальные методики измерения потерь в трансформаторах и дросселях, что обеспечило высокий уровень достоверности полученных результатов.

изложены основные критерии, подходы, методы и этапы разработанной методологии моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов. Представлены результаты моделирования с помощью разработанных аналитических методик, которые подтверждаются результатами численного анализа и экспериментальных исследований на макетах;

раскрыты особенности влияния топологии обмоток и геометрических параметров проводников на распределение токов и величину потерь, что обеспечивает более глубокое понимание природы скин-эффекта и эффекта близости в условиях протекания высокочастотных импульсных токов;

изучены методы расчета потерь в обмотках трансформаторов и дросселей с помощью представления слоев обмоток в виде плоских проводников и последующего анализа напряженности поля на границах слоев.

проведена модернизация существующих методик моделирования высокочастотных потерь в витках трансформаторов в части возможности расчета потерь в трансформаторах с чередующимися обмотками при произвольной форме протекающего тока, а также в части возможности расчета потерь в трансформаторах с поочередно протекающими токами в обмотках.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в виде моделей и методик на предприятиях: ООО «АЕДОН», АО НВП «ПРОТЕК», АО НПП «Автоматизированные системы связи», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ» для подготовки магистров по направлению 11.04.03 Конструирование и технология радиоэлектронных средств (профиль «Силовая электроника»);

определены возможности применения разработанных методик расчета и моделирования потерь, а также реализованных программных решений в цикле

проектирования импульсных источников питания в составе радиоэлектронных средств;

создана методика моделирования потерь, вызываемых эффектом близости в магнитных компонентах, интегрированная в цикл проектирования радиоэлектронных устройств повышенной эффективности и отличающаяся использованием данных о напряженности поля на границах слоев обмоток, что позволяет моделировать потери в трансформаторах при чередовании витков, а также при различной очередности протекания токов в обмотках;

представлены рекомендации по применению разработанных методик при модернизации существующих и разработке перспективных импульсных источников питания повышенной энергетической эффективности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: в результате выполненного численного моделирования с использованием апробированных программных средств были верифицированы результаты расчета потерь в витках обратногоходового трансформатора и дросселя, выполненные с помощью разработанного в рамках работы программного обеспечения, реализующего предложенные методики. Проведены эксперименты, в ходе которых измерены потери в магнитных компонентах макетов импульсных преобразователей. Достоверность полученных результатов подтверждается высокой степенью совпадения результатов, полученных с помощью разработанных методик с результатами моделирования в Ansys Maxwell, а также экспериментальных измерений, выполненных с использованием сертифицированного оборудования и поверенных измерительных приборов;

теория согласуется с данными экспериментальных и теоретических исследований потерь, вызываемых вихревыми токами в магнитных компонентах, проведенных в России и за рубежом и опубликованных в работах Р. Dowell, В. Carsten, Л. Духон, Ж. Vandelac, а также отечественных исследователей, включая Л.И. Сахно, Д.И. Лихачева и А.И. Тихонова,

идея базируется на обобщении передового опыта моделирования полей в трансформаторах и дросселях, а также анализа высокочастотных потерь, вызываемых скин-эффектом и эффектом близости в России и за рубежом и применении новых подходов к проектированию магнитных компонентов. В частности, используются аналитические методики расчета высокочастотных потерь для поиска оптимальной топологии витков трансформатора, а также оптимальной толщины (диаметра) проводника обмоток.

использовано сравнение авторских данных и результатов, полученных ранее по рассматриваемой в диссертации тематике;

установлено качественное и количественное соответствие частных и предельных результатов диссертации с результатами, представленными в работах, посвященных анализу высокочастотных потерь, в трансформаторах, как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях;

использовано апробированное программное обеспечение Ansys Maxwell для проведения численного моделирования потерь, вызываемых эффектом близости для различных конструкций обмоток трансформаторов и дросселей.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах работы над диссертацией, включая теоретические исследования, разработку методик расчета и моделирования высокочастотных потерь обмотках, обработку и интерпретацию данных моделирования трансформаторов и дросселей, личном участии в апробации результатов исследования, разработке макетных образцов и проведении экспериментальных исследований, а также подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Веретенников Н.Ю. подробно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

На заседании 25.09.2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития теории, техники и технологии проектирования магнитных компонентов с повышенной энергетической эффективностью присудить Веретенникову Н.Ю. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Макаров
Олег Юрьевич

Фёдоров
Сергей Михайлович

25 сентября 2025 г.