

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.В. Турский¹, А.А. Пирогов¹, М.В. Хорошайлова¹, И.А. Турский²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена комплексная методика проектирования мощных импульсных источников питания (ИИП) для специальной аппаратуры, применяемой в вычислительной технике, системах связи, медицинском оборудовании и радиоэлектронной борьбе (РЭБ), направленная на минимизацию временных затрат и оптимизацию ключевых характеристик. Методика включает поэтапный анализ технического задания, выбор оптимальной схемотехнической топологии (однотактной или двухтактной), расчет и моделирование параметров силовой части, в частности трансформатора и дросселей, с использованием специализированного программного обеспечения. Особое внимание уделено практическим аспектам отладки опытных образцов. На реальных примерах проанализированы типичные проблемы, возникающие на этапе создания рабочего образца: выбросы напряжения при коммутации ключевых элементов, приводящие к ложным срабатываниям системы управления; паразитный резонанс в первичной цепи трансформатора; повышенные пульсации выходного напряжения из-за отказа снабберных цепей. Для каждой проблемы предложены и экспериментально проверены эффективные решения, такие как коррекция времени переключения транзисторов, смещение рабочей частоты преобразователя для ухода от резонанса и подбор стойких к высокочастотным воздействиям компонентов. Показано, что применение предлагаемой методики позволяет последовательно выявлять и устранять недостатки конструкции, обеспечивая соответствие готового устройства заданным техническим требованиям

Ключевые слова: импульсный источник питания, электромагнитная совместимость, оптимизация параметров, расчет трансформатора, тепловые режимы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (№ FZGM-2025-0002)

Введение

Современная специальная аппаратура, применяемая в критически важных областях, таких как системы связи, вычислительная техника, медицинское оборудование и комплексы радиоэлектронной борьбы, предъявляет высокие требования к источникам вторичного электропитания. Ключевыми критериями становятся не только высокий коэффициент полезного действия, но и бесперебойная работа в экстремальных условиях, устойчивость к внешним воздействиям, минимальные массогабаритные показатели и строгое соответствие нормам электромагнитной совместимости. Этим требованиям в полной мере отвечают импульсные источники питания, которые полностью вытеснили линейные аналоги [1, 2]. Однако проектирование мощных импульсных источников питания сопряжено со значительными трудностями, обусловленными сложностью электромагнитных процессов, происходящих в силовой части преобразователя. В

связи с этим актуальной задачей является разработка комплексной методики проектирования, которая бы системно объединила этапы выбора топологии, расчета параметров, моделирования, практической реализации и испытаний, позволяя последовательно выявлять и устранять потенциальные проблемы.

Предлагаемый подход позволяет минимизировать временные затраты на проектирование за счет глубокой интеграции расчетных и моделирующих процедур с последующей экспериментальной верификацией, что подтверждается результатами испытаний опытного образца.

Расчет компонентов мощных импульсных источников вторичного электропитания

Ключевым этапом проектирования импульсного источника питания является расчет его силовой части, в частности, моточных изделий. Исходной точкой служит определение выходной мощности преобразователя, которая рассчитывается по формуле (1) как произведение требуемых выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и тока $I_{\text{вых}}$ с введением коэффициента $k=1.3$,

учитывающего КПД преобразования порядка 85 % и необходимый запас надёжности.

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} * I_{\text{вых}} * k. \quad (1)$$

Полученное значение мощности позволяет перейти к выбору магнитопровода силового трансформатора, поскольку каждый типоразмер ферритового сердечника характеризуется своей габаритной мощностью на основе геометрических параметров (площади окна S_o и поперечного сечения S_C), рабочей частоты f и допустимой магнитной индукции B_m и определяется как

$$P_{\text{раб}} = S_o * S_C * f * B_m. \quad (2)$$

После выбора конкретного сердечника выполняется расчет обмоток. Минимальное количество витков первичной обмотки, необходимое для исключения насыщения магнитопровода, находится как

$$N_1 = \frac{0.25 * 10^4 * U_{\text{мин}}}{f * B_m * S_C}, \quad (3)$$

где $U_{\text{мин}}$ – минимальное входное напряжение.

Количество витков вторичной обмотки рассчитывается исходя из требуемого выходного напряжения

$$N_2 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} * N_1. \quad (4)$$

Индуктивность намотанной катушки связана с параметрами магнитопровода и числом витков соотношением

$$L = \mu_0 * \mu * S_C * \frac{N^2}{l_a}. \quad (5)$$

Для выходного дросселя рассчитывается необходимая индуктивность, обеспечивающая заданный уровень пульсаций тока

$$L = (U_{in} - U_{out}) * \frac{U_{out}}{U_{in}} * \frac{1}{f} * \frac{1}{0.3 * I_{out}}. \quad (6)$$

Пиковый ток через дроссель и количество его витков определяются на основе выбранного сердечника.

Анализ цепей управления основан на законе Ома, а оценка коммутационных выбросов напряжения на индуктивных элементах производится с учётом скорости изменения тока.

Методика проектирования мощного источника вторичного электропитания

Разработанная методика проектирования мощных импульсных источников питания, представленная на рис. 1, реализует системный подход к созданию преобразовательной техники для специальных применений.

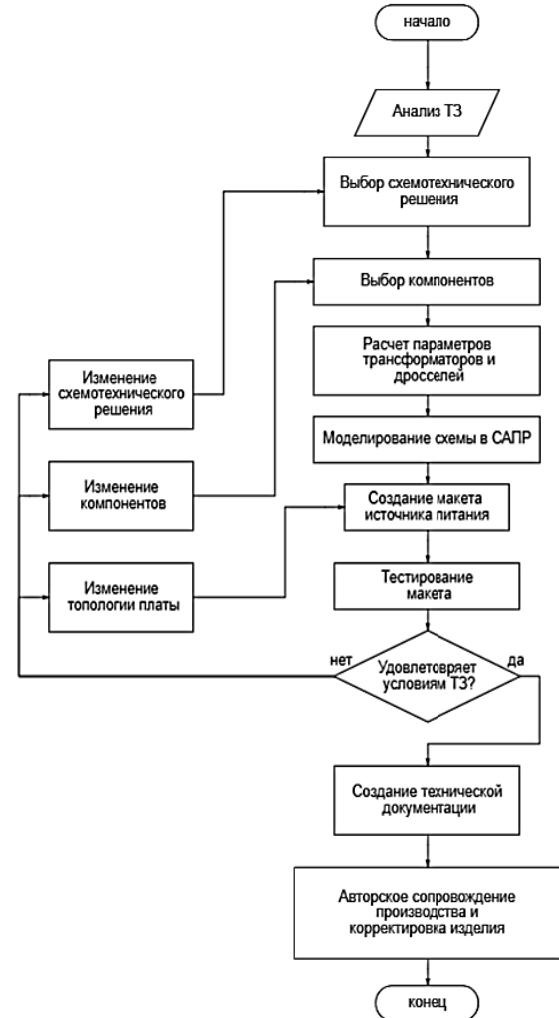


Рис. 1. Блок-схема методики проектирования источника питания большой мощности

Начальный этап предполагает всесторонний анализ технических требований, включающий спецификацию мощностных характеристик, диапазонов входных и выходных напряжений, требований к гальванической развязке, систем защиты и условий эксплуатации [3]. Особое внимание уделяется параметрам выходного напряжения - точности стабилизации и допустимому уровню пульсаций.

Ключевым аспектом методики является обоснованный выбор схемотехнической топологии, определяемый требованиями к гальванической развязке и выходной мощности. Для

преобразователей без гальванической развязки применяются базовые топологии Buck, Boost и Buck-Boost, в то время как для сетевых источников питания выбор осуществляется между обратноходовой (до 150-200 Вт), полумостовой (до 1 кВт) и мостовой (свыше 1 кВт) конфигурациями. С увеличением мощности усиливается влияние паразитных параметров элементов, что требует специальных мер компенсации.

Последовательность проектирования предполагает выбор компонентной базы на основе анализа энергетических преобразований в системе. Центральным элементом является силовой трансформатор, параметры которого рассчитываются с учетом марки феррита, количества витков обмоток и импульсных токов [4, 5]. Для управления ключевыми элементами в мощных преобразователях предпочтительнее применение IGBT-транзисторов, характеризующихся повышенной токовой нагрузочной способностью и оптимальной динамикой переключения, что позволяет минимизировать паразитные выбросы напряжения.

Расчет параметров пассивных компонентов и моделирование в средах автоматизированного проектирования позволяют оптимизировать характеристики устройства на ранних стадиях проектирования [6].

Завершающие этапы методики включают подготовку производственной документации и организацию серийного выпуска с последующим сопровождением изделия. Предложенный подход позволяет систематизировать процесс разработки и сократить временные затраты на создание надежных источников питания, отвечающих строгим требованиям специальной аппаратуры.

Экспериментальное исследование и оптимизация динамических характеристик мощного импульсного преобразователя

Практическая реализация методики проектирования мощных импульсных источников питания была апробирована на примере разработки понижающего преобразователя (букк-конвертера) [7]. Исходные параметры проектирования составили: входное напряжение 10 В, выходное напряжение 3 В при токе нагрузки 4 А и частоте коммутации 300 кГц. Расчетное значение индуктивности дросселя по формуле (1) составило 5.833 мкГн. Дальнейший расчет параметров магнитопровода выполнялся с использованием специализированного программного обеспечения, интерфейс которого представлен на рис. 2.

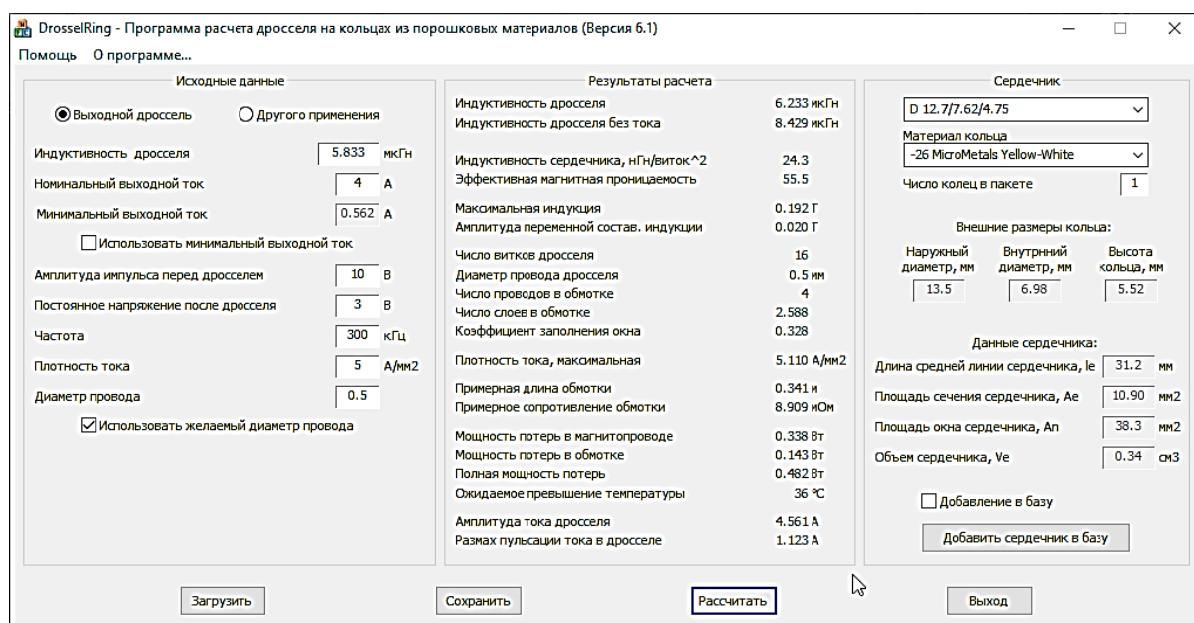


Рис. 2. Окно программы при внесении исходных данных при расчете дросселя

Выбор геометрических параметров сердечника и магнитных свойств материала осуществлялся на основе анализа габаритной мощности и тепловых режимов работы. Критическим аспектом проектирования стало обеспечение оптимальной плотности тока в обмотках с

учетом условий охлаждения. Как демонстрирует рис. 3, выбор недостаточного размера магнитопровода автоматически детектируется программой расчета, что предотвращает ошибки на ранних стадиях проектирования.

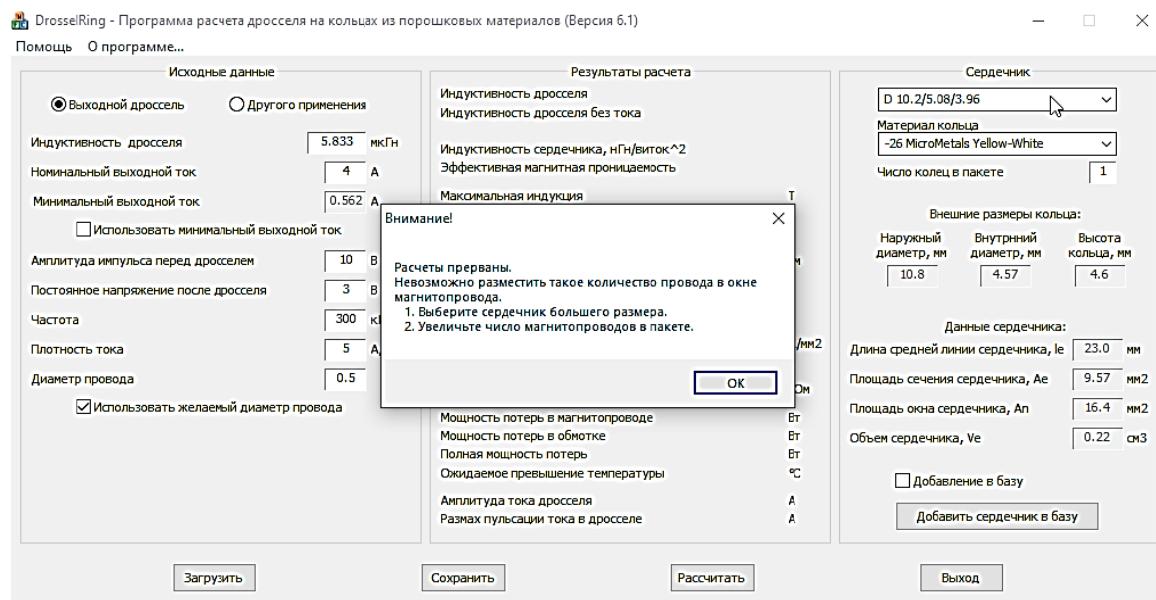


Рис. 3. Окно программы в случае выбора слишком малого сердечника

Для реализации был выбран сердечник DT106-2 с результатами окончательного расчета, показавшим необходимость выполнения 16 витков четырьмя параллельными проводами диаметром 0.5 мм.

Экспериментальные исследования выявили ряд характерных проблем, возникающих при коммутации силовых ключей. Осциллограммы на рис. 4 демонстрируют паразитные выбросы

напряжения в первичной обмотке трансформатора, обусловленные сверхбыстрыми фронтами переключения IGBT-транзисторов. Эти выбросы, достигающие амплитуды, достаточной для ложного срабатывания схемы управления, были устранены путем оптимизации динамических характеристик ключей за счет введения резисторов в затворные цепи (рис. 4, г).

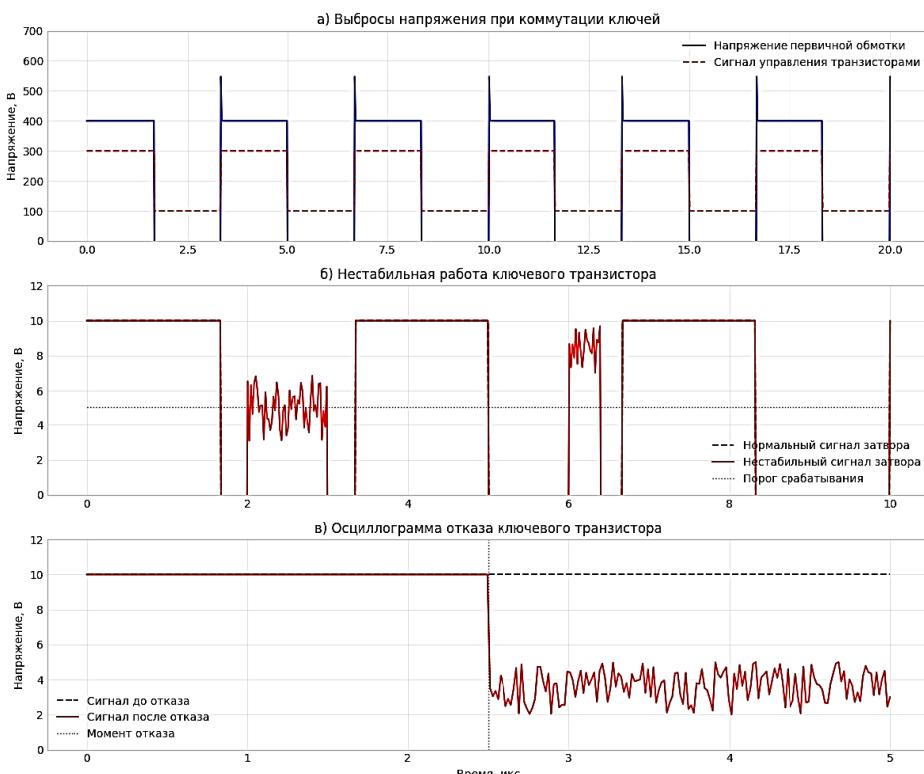


Рис. 4. Осциллограммы процессов коммутации в мощном импульсном преобразователе на различных этапах отладки

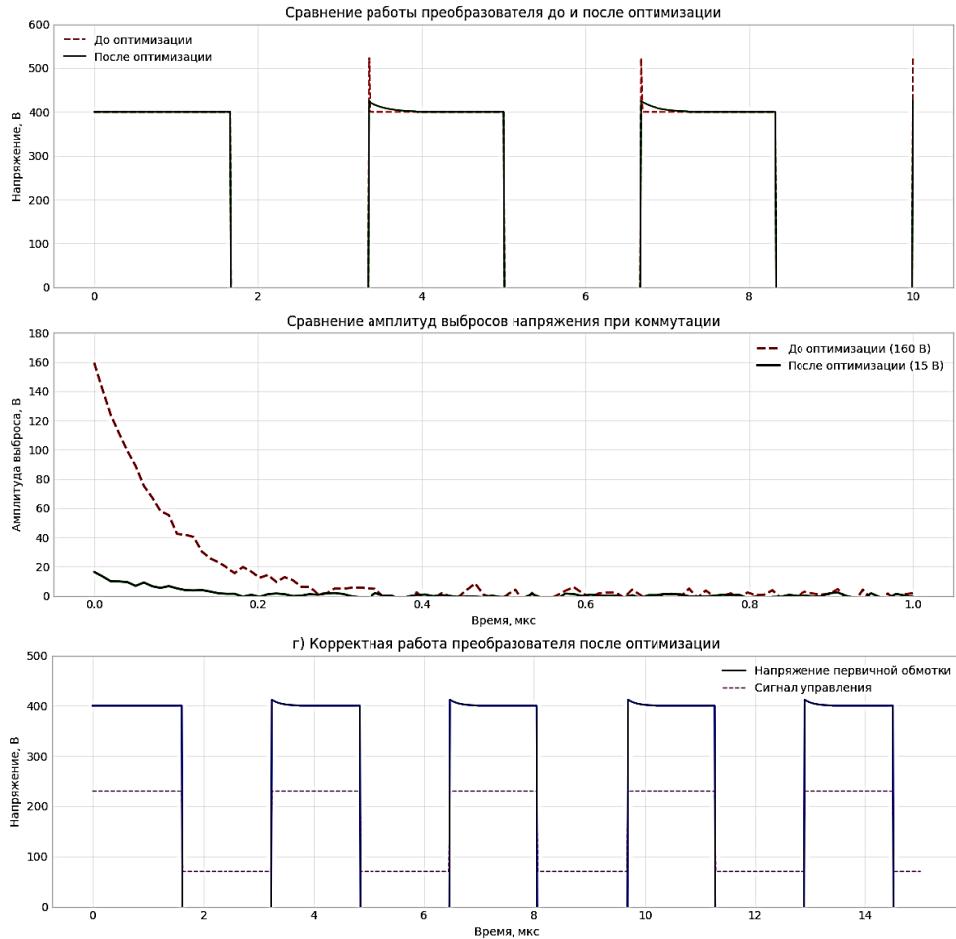


Рис. 4. Осциллограммы процессов коммутации в мощном импульсном преобразователе на различных этапах отладки (окончание)

На рис. 4, *а* показаны значительные выбросы напряжения амплитудой до 180 В на первичной обмотке трансформатора в моменты коммутации ключевых элементов, работающих на частоте 300 кГц. Эти выбросы, возникающие из-за чрезмерно крутых фронтов переключения транзисторов, превышали пороговый уровень логических элементов системы управления, что приводило к ложным срабатываниям. Пунктирной линией обозначен сигнал управления затворами транзисторов, демонстрирующий корректную логику работы контроллера.

Рис. 4, *б* детализирует проблему нестабильной работы силового ключа, где вместо ожидаемого четкого прямоугольного сигнала амплитудой 10 В наблюдаются хаотические колебания уровня напряжения от 3 до 7 В в

отдельные моменты времени. Такое поведение, длившееся примерно 0.5 мкс, было вызвано помехами от выбросов напряжения силовой цепи.

На рис. 4, *в* зафиксирован момент полного отказа ключевого транзистора при времени около 2.5 мкс. После этого момента выходное напряжение транзистора снизилось с нормального уровня 10 В до нестабильного значения 2-5 В, что свидетельствует о термическом разрушении полупроводниковой структуры устройства.

Далее на рис. 5 на представленных осциллограммах последовательно отображены процессы возникновения и устранения резонансных явлений в силовой цепи импульсного источника питания.

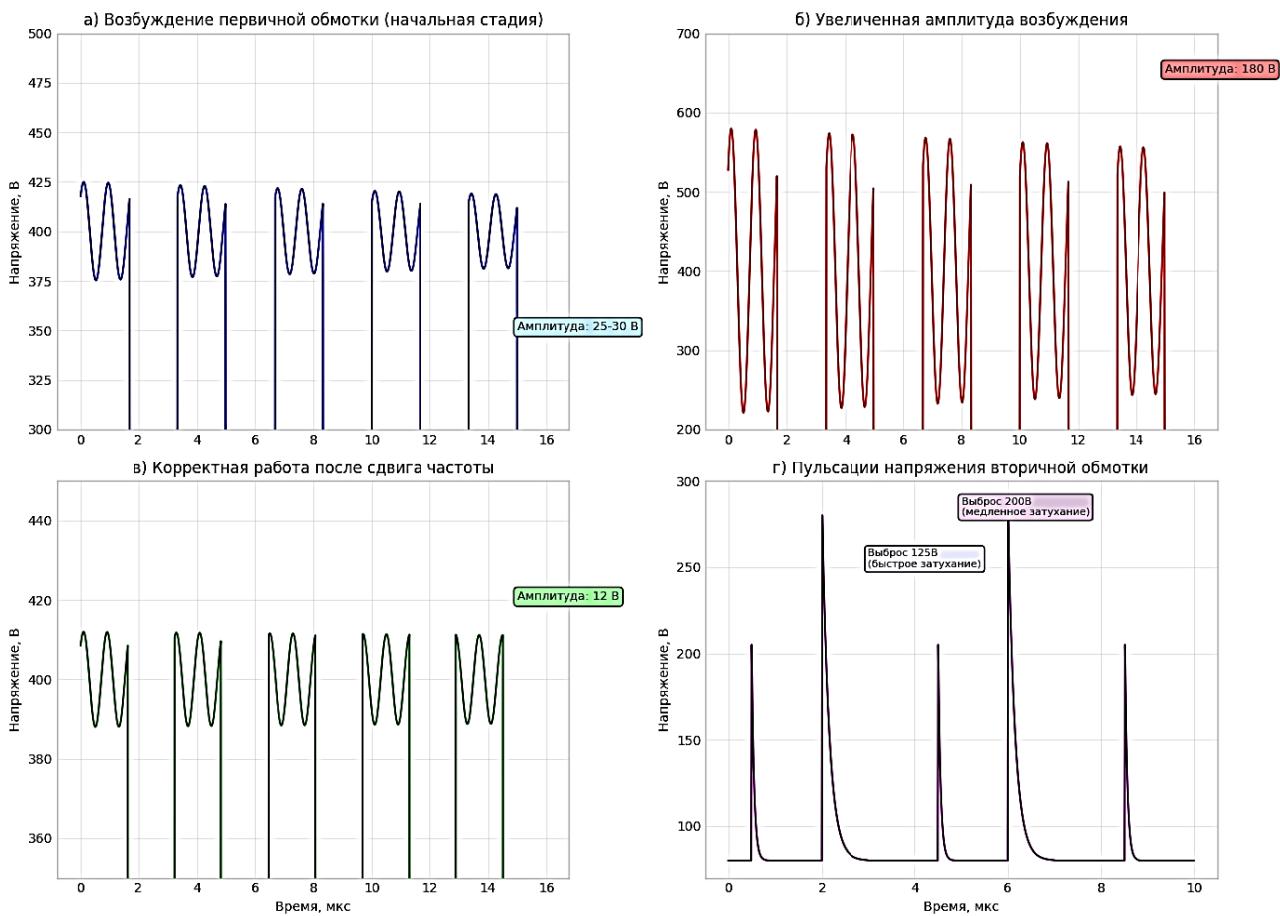


Рис. 5. Динамика резонансных явлений и оптимизация переходных процессов в силовой цепи импульсного преобразователя

Рис. 5, а демонстрирует начальную стадию возбуждения первичной обмотки трансформатора, где на фоне рабочего напряжения 400 В наблюдаются резонансные колебания амплитудой 25-30 В с частотой 1.2 МГц. Данное явление проявлялось в виде характерного потрескивания на половине мощности преобразователя.

При увеличении нагрузки до номинального значения амплитуда резонансных колебаний возрастила до 180 В, что показано на рис. 5, б. Такая значительная величина выбросов создавала механические напряжения в ферритовом сердечнике, что могло привести к его разрушению в течение короткого времени эксплуатации. Анализ временных параметров показал, что длительность затухания колебаний составляла приблизительно 100 микросекунд.

Решением проблемы резонанса стало смещение рабочей частоты преобразователя с 300 кГц на 310 кГц, что позволило выйти из зоны резонансной частоты системы. Как видно на рис. 5, в, это снизило амплитуду колебаний

до 12 В, что является безопасным значением для работы преобразователя. Длительность переходного процесса при этом увеличилась до 200 микросекунд, но это не оказывало влияния на основные характеристики устройства.

На рис. 5, г представлена осциллограмма напряжения на вторичной обмотке, где видны асимметричные выбросы: в первом плече преобразователя амплитуда составляла 125 В с быстрым затуханием за 0.5 микросекунды, во втором плече - 200 В с медленным затуханием продолжительностью 1.5 микросекунды. Такая асимметрия указывала на неравномерность работы ключевых элементов.

Детальный анализ выброса амплитудой 200 В, представленный на рис. 6, показал, что проблема была вызвана выходом из строя снабберного конденсатора в одном из плеч преобразователя. Конденсатор не выдерживал скорости нарастания напряжения 200 В за 0.3 микросекунды и терял свои демпфирующие свойства.

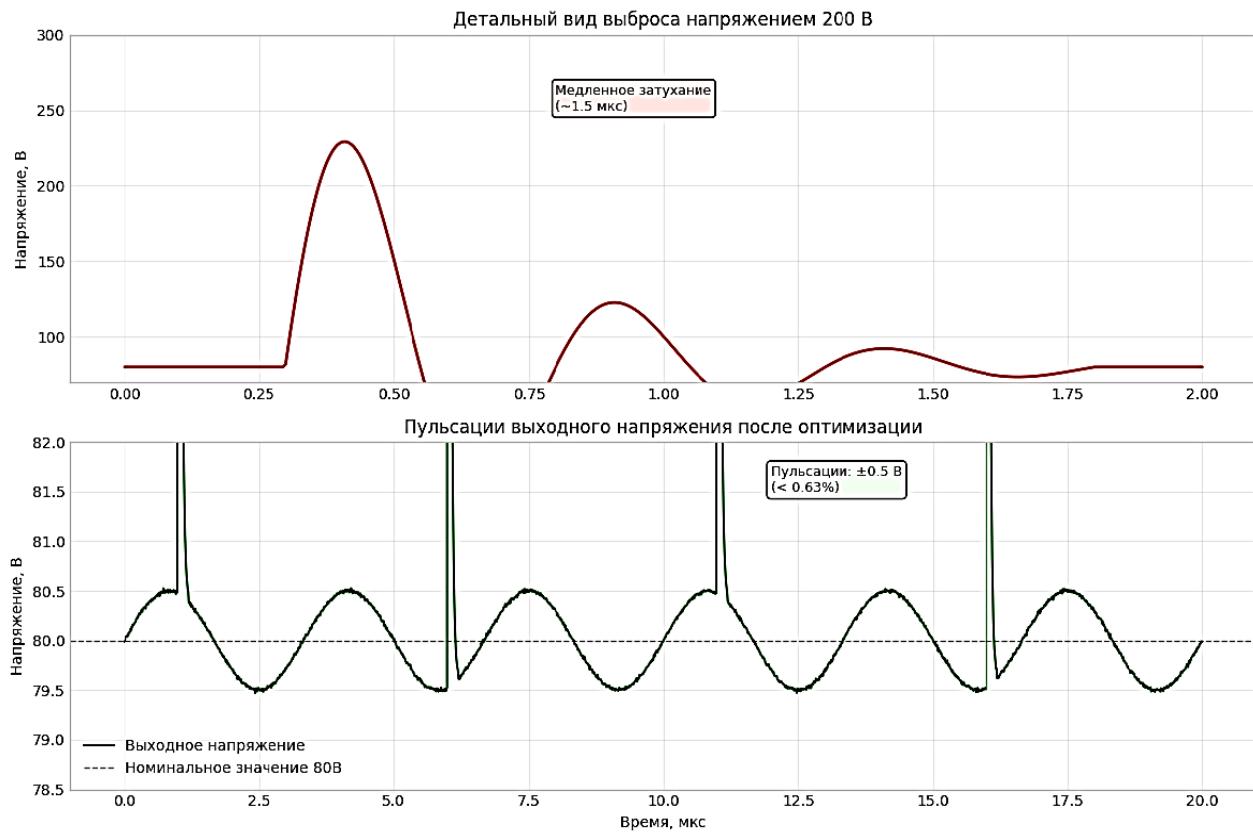
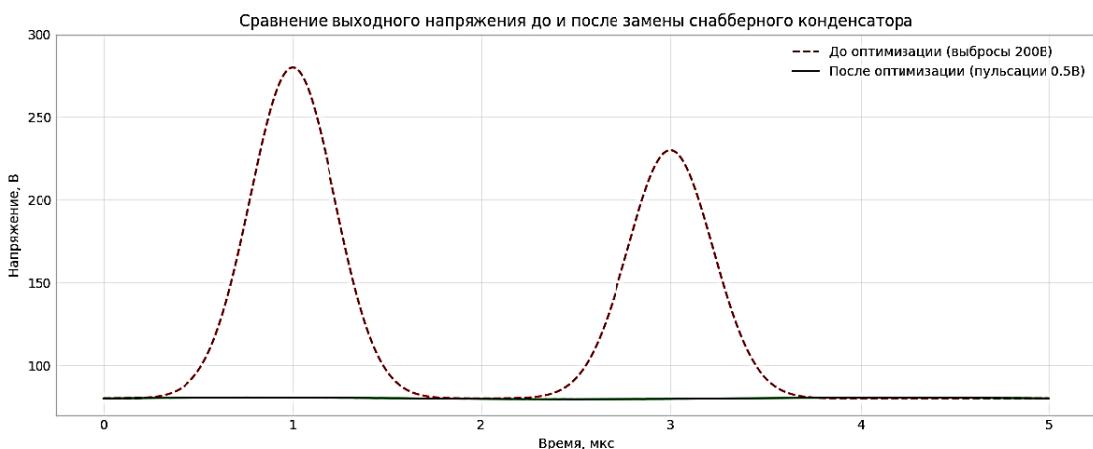


Рис. 6. Выброс амплитуды и пульсации выходного напряжения

После замены конденсатора на компонент с улучшенными частотными характеристиками удалось добиться стабильной работы преобразователя. Уровень пульсаций выходного напряжения снизился до ± 0.5 В при номинальном значении 80 В, что составляет менее 0.63 % и удовлетворяет требованиям техниче-

ского задания. Длительность остаточных выбросов не превышает 20 наносекунд, что свидетельствует о эффективном демпфировании переходных процессов.

На сравнительной осциллограмме рис. 7 наглядно продемонстрирована эффективность замены снабберного конденсатора.



Ключевые параметры проблем и решений:

1. Резонансная частота системы: 1.2 МГц
2. Амплитуда возбуждения до оптимизации: 180 В
3. Амплитуда возбуждения после сдвига частоты: 12 В
4. Выбросы на вторичной обмотке: 125 В (быстрые) / 200 В (медленные)
5. Пульсации после оптимизации: ± 0.5 В (< 0.63% от 80 В)

Рис. 7. Сравнение выходного напряжения

До проведения оптимизации выходное напряжение характеризовалось значительными выбросами амплитудой до 200 вольт, возникавшими в моменты коммутации ключевых транзисторов. Эти выбросы, существенно превышавшие номинальное значение 80 вольт, представляли серьезную угрозу для стабильности работы питаемой аппаратуры и могли приводить к ложным срабатываниям систем защиты. После замены конденсатора на компонент с улучшенными частотными характеристиками амплитуда помех снизилась более чем в 400 раз - с 200 вольт до 0.5 вольт. Такой уровень пульсаций, составляющий менее 0.63 % от номинального выходного напряжения, полностью соответствует требованиям технического задания и обеспечивает надежную работу подключенных устройств. Временные параметры переходных процессов также значительно улучшились: длительность выбросов сократилась с 1.5 микросекунд до нескольких десятков наносекунд, что свидетельствует о восстановлении демпфирующих свойств снабберной цепи.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и успешно апробирована комплексная методика проектирования мощных импульсных источников питания для аппаратуры специального назначения. Практическая реализация методики подтвердила ее эффективность на примере создания преобразователя с выходными параметрами 3 В при токе нагрузки 4 А и рабочей частотой 300 кГц. Ключевым достижением работы стало последовательное выявление и устранение критических проблем, характерных для силовых цепей высокой мощности. Экспериментально установлено, что первоначальные выбросы напряжения амплитудой до 200 В, обусловленные резонансными явлениями на частоте 1.2 МГц и недостаточным демпфированием, были снижены до безопасного уровня 12 В за счет коррекции времени переключения ключевых элементов и смещения рабочей частоты на 10 кГц.

Существенным преимуществом предложенной методики является ее итерационный характер, позволяющий на этапе компьютерного моделирования и прототипирования идентифицировать проблемы, которые традиционно выявляются лишь на стадии серийного производства. Оптимизация снабберных цепей позволила снизить уровень пульсаций выходного напряжения с 200 В до 0.5 В, что составляет менее 0.63 % от номинального значения 80 В и значительно превышает требования технического задания. Доказана целесообразность применения IGBT-транзисторов в мощных преобразователях, обеспечивающих оптимальное соотношение скорости коммутации и устойчивости к переходным процессам.

Литература

1. Савин М., Абрамов С. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 8 (189). С. 40-44.
2. Хорошайлова М.В., Пирогов А.А., Демихова А.С. Схема выпрямителя для динамического улучшения эффективности преобразования мощности в системах сбора внешней радиочастотной энергии // Энергетика, информатика, инновации - 2024: труды участников XIV Междунар. науч.-техн. конф., Смоленск, 13–14 ноября 2024 года. Смоленск: Универсум, 2024. С. 115-119.
3. Хорошайлова М.В., Чернышов А.В., Леденев Д.А. Методика программирования микроконтроллера MDR32F9Q2I в задачах управления и мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 2. С. 76-81.
4. Comparative Review of High-Frequency Transient DC Bias Current Mitigation Strategies in Dual-Active-Bridge DC-DC Converters Under Phase-Shift Modulations / Q. Bu, H. Wen, H. Shi, Y.A. Zhu // IEEE Trans. Ind. Appl. 2021. 58. pp. 2166–2182.
5. Hu S., Li X, Zheng Q.F. A dual-bridge DC–DC resonant converter using extended PWM and phase-shift control // IEEE Trans. Ind. Appl. 2021. 57. pp. 4009–4020.
6. Хорошайлова М.В., Пирогов А.А. Разработка архитектуры высокочастотного цифрового ШИМ модулятора для DC-DC преобразователя // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 18–22 ноября 2024 года. Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. С. 389-392.
7. Asymmetrical-PWM DAB Converter With Extended ZVS/ZCS Range and Reduced Circulating Current for ESS Applications / E.L. Carvalho [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. 36 (11). pp. 12990–13001.

Поступила 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru
Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Турецкий Иван Андреевич – инженер, АО НВП «ПРОТЕК» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: tav7@mail.ru

DESIGN METHODOLOGY FOR HIGH-POWER SWITCHING POWER SUPPLIES FOR SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT WITH IMPROVED ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS

A.V. Turetskiy¹, A.A. Pirogov¹, M.V. Khoroshaylova¹, I.A. Turetskiy²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK», Voronezh, Russia

Abstract: we present a comprehensive design methodology for high-power switching power supplies (SPS) for special equipment used in computing, communication systems, medical equipment and electronic warfare, aimed at minimizing time costs and optimizing key characteristics. The methodology includes a step-by-step analysis of the technical task, selection of the optimal circuit topology (single-stroke or push-pull), calculation and modeling of the parameters of the power unit, in particular the transformer and chokes, using specialized software. Special attention is paid to the practical aspects of debugging prototypes. Using real-world examples, we analyzed typical problems that arise at the stage of creating a working sample: voltage surges during switching of key elements, leading to false alarms of the control system; parasitic resonance in the primary circuit of the transformer; increased output voltage ripples due to the failure of the supply chains. We proposed effective solutions and experimentally tested for each problem, such as correcting the switching time of transistors, shifting the operating frequency of the converter to avoid resonance, and selecting components resistant to high-frequency effects. We show that the application of the proposed technique makes it possible, therefore, to identify and eliminate design flaws, ensuring that the finished device meets the specified technical requirements

Key words: switching power supply, electromagnetic compatibility, parameter optimization, transformer calculation, thermal modes

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (no FZGM-2025-0002)

References

1. Savin M., Abramov S. “Calculation and design of a planar transformer for a reverse-flow converter”, *Electronics: Science, Technology, Business (Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes.)*, 2019, no. 8(189), pp. 40-44.
2. Khoroshaylova M.V., Pirogov A.A., Demikhova A.S. “Rectifier circuit for dynamic improvement of power conversion efficiency in systems for collecting external radio frequency energy”, *Proc. of the XIV Scientific and Technical Int. Conf.: Energy, Informatics, Innovations – 2024 (Energetika, informatika, innovatsii - 2024)*, Smolensk, 2024, pp. 115-119.
3. Khoroshaylova M.V., Chernyshov A.V., Ledenev D.A. “Methodology of programming the MDR32F9Q2I microcontroller in control and monitoring tasks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 76-81.
4. Bu V., Wen H., Shi H., Zhu Y.A. “Comparative review of strategies for reducing high-frequency transient DC bias currents in DC converters with two active bridges in phase shift mode”, *IEEE Trans. Ed. Appendix*, 2021, no. 58, pp. 2166-2182.
5. Hu S., Li H., Zheng K.F. “A two-bridge resonant DC-to-DC converter using advanced PWM modulation and phase shift control”, *IEEE Trans. Ind. Appendix*, 2021, no. 57, pp. 4009-4020.
6. Khoroshaylova M.V., Pirogov A.A. “Architectures of high-frequency Development of a digital PWM modulator for a direct current converter”, *Proc. of the VIII Int. Sci. and Practical Conf.: Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (Radioinfocom-2024)*, Moscow, November 18-22, 2024, 2024, pp. 389-392.
7. Carvalho E.L. et al. “Asymmetric PWM DAB converter with extended ZVS/ZCS range and reduced circulation current for ESS applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, no. 36 (11), pp. 12990-13001.

Submitted 24.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Andrey V. Turetskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail:tav7@mail.ru

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), pmv2205@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9167-9538

Ivan A. Turetskiy, Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: tav7@mail.ru