

УДК 621.317:681.2-5

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-127-140>

Разработка установки электрогидродинамического распыления конденсированных сред: схемотехническая реализация высоковольтного источника напряжения

А. И. Жакин¹, В. Н. Лесных¹, П. А. Белов^{2✉}

¹Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

²Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: beliy2010@rambler.ru

Резюме

Целью исследования в данной работе является разработка высоковольтного источника напряжения, силовая часть которого будет толерантна к резким скачкам тока, связанным с пробоем диэлектрической жидкости для ЭГД-экструдера. Необходимость разработки высоковольтного источника напряжения возникла из-за специфики его использования, так как конечной целью является изготовление установки электрогидродинамического распыления конденсированных сред.

Материалы. Для проектирования и исследования режимов работы высоковольтного источника напряжения были использованы методы моделирования электронных схем и проектирования печатных плат в программах Multisim и Altium Designer с последующей разработкой Android-приложения для управления высоковольтным источником питания. Корпус устройства разработан в программе AutoCAD.

Результаты. Схемотехническая структура высоковольтного источника напряжения с цифровым управлением разработана на базе микроконтроллера ATmega328. Реализовано модульное разделение устройства, включающее силовую и управляющую части, а также коммуникационные и защитные блоки. Выполнена схема управляющей части высоковольтного источника, способная обеспечивать стабилизированное питание микроконтроллера и периферии, отображение информации о температуре, управление и отражение состояния на ЖК-дисплее, а также связь с внешними устройствами для мониторинга и настройки. При помощи специализированной программы моделирования Multisim подтверждена работоспособность схемы: выходное напряжение соответствует расчётному и демонстрирует стабильную работу устройства. Трассировка и 3D-моделирование печатной платы выполнено с помощью комплексной системы автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств Altium Designer, в соответствии с конструктивными и схемотехническими особенностями разрабатываемого устройства.

Заключение. Разработана и смоделирована схема высоковольтного источника напряжения. Проведены экспериментальные исследования разработанного источника высокого напряжения для верификации его характеристик, особенно устойчивости к токовым скачкам и стабильности выходного напряжения.

Ключевые слова: высоковольтный источник напряжения; ЭГД-экструдер; микроконтроллер.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Жакин А. И., Лесных В. Н., Белов П. А. Разработка установки электрогидродинамического распыления конденсированных сред: схемотехническая реализация высоковольтного источника напряжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. Т. 16, № 1. С. 127–140. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-127-140>.

Поступила в редакцию 01.12.2025

Подписана в печать 02.02.2026

Опубликована 25.03.2026

© Жакин А. И., Лесных В. Н., Белов П. А., 2026

Development of the condensed matter electrohydrodynamic spraying unit: schematic implementation of a high-voltage voltage source

Anatoly I. Zhakin¹, Vasily N. Lesnykh¹, Pavel A. Belov^{2✉}

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str., 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: beliy2010@rambler.ru

Abstract

The objective of this study is to develop a high-voltage power supply with a power section capable of withstanding sharp current surges associated with dielectric fluid breakdown in an EHD extruder. The need to develop a high-voltage voltage source arose due to the specifics of its use. Since the final goal is to manufacture an electrohydrodynamic spraying unit for condensed matter, at this stage of research, a schematic implementation of a voltage source is presented.

Methods. Electronic circuit modeling and printed circuit board design in Multisim and Altium Designer were used to design and study the operating modes of the high-voltage power supply. An Android application for controlling the high-voltage power supply was subsequently developed. The device enclosure was designed in AutoCAD.

Results. The circuit design of the digitally controlled high-voltage power supply was developed using an ATmega328 microcontroller. A node-by-node breakdown of the device was implemented, including the power and control sections, as well as the communication and protection units. A control section circuit diagram for the high-voltage power supply was developed, capable of providing stabilized power to the microcontroller and peripherals, displaying temperature information, controlling and displaying status on an LCD screen, and communicating with external devices for monitoring and configuration. Using the specialized Multisim simulation program, the circuit's operability was confirmed: the output voltage matches the calculated value and demonstrates stable operation. The printed circuit board (PCB) layout and 3D modeling were performed using the Altium Designer integrated CAD system, in accordance with the design and circuitry features of the device being developed.

Conclusions. A high-voltage power supply circuit was developed and simulated. Experimental studies of the developed high-voltage power supply were conducted to verify its characteristics, particularly its immunity to current surges and output voltage stability.

Keywords: high-voltage power supply; EHD extruder; microcontroller.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zhakin A.I., Lesnykh V.N., Belov P.A. Development of the condensed matter electrohydrodynamic spraying unit: schematic implementation of a high-voltage voltage source. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2026;16(1):127-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2026-16-1-127-140>.

Received 01.12.2025

Accepted 02.02.2026

Published 25.03.2026

Введение

Актуальной инженерной задачей является разработка высоковольтного источника питания с повышенной устойчивостью силовой части к резким скачкам тока, возникающим в результате пробоя диэлектрической жидкости. Обеспечение способности силовой части выдерживать

кратковременные высокоамплитудные токи, а также иметь высокую энергоэффективность, точность регулировки выходного напряжения и компактность является современной технической задачей.

Актуальность данных исследований обусловлена растущими требованиями к

эффективности, управляемости и безопасности оборудования в различных отраслях промышленности [1], в том числе в полимерной переработке и производстве композитных материалов [2]. В частности, в экструзионно-грануляционных устройствах (ЭГД экструдерах) [3] высоковольтный источник питания используется для создания управляемого электрического поля, которое влияет на ориентацию макромолекул [4], ускоряет процессы кристаллизации [5] и позволяет получать материалы с улучшенными механическими [6] и физико-химическими свойствами [7]. Применение стабилизированного высоковольтного напряжения даёт возможность существенно повысить качество готовой продукции [8], снизить потери сырья [9] и увеличить производительность оборудования [10].

Однако существуют противоречивые требования к созданию источника высокого напряжения – это необходимость высокой надежности и стабилизации выходного напряжения, состоящих из сложных схем, что влечет за собой повышение стоимости и габаритов устройства [11]. В свою очередь, на практике все совсем иначе: современный рынок выдвигает требования к упрощенной, компактной и экономичной конструкции, пригодной для промышленного и лабораторного применения [11].

Столкнувшись с требованием устойчивости к кратковременным резким токовым перегрузкам и обеспечением стабильной работы прибора, схемотехническим решением является использование ключевых элементов с повышенными предельными токовыми характеристиками, способными выдержать импульсные токи без разрушения структуры [12]. Кроме того, для улучшения характеристик ИВН будут внесены защитные и демпфирующие элементы, предназначенные для подавления

выбросов напряжения. Формирование и регулировку ШИМ-сигнала реализует микроконтроллер, который обеспечит плавное управление скважностью сигнала, обратную связь и оптимизирование работы под нагрузкой [13].

Ключевым решением для достижения точной регулировки, цифрового управления и комплексной защиты является разработка высоковольтного источника с использованием микроконтроллера [14]. В отличие от аналоговых схем, где параметры фиксированы аппаратно, микроконтроллер позволяет программно адаптировать характеристики источника под динамически меняющиеся условия нагрузки, обеспечивая: цифровую стабилизацию, диагностику, настройку выходных параметров [15].

Структурная схема, изображенная на рисунке 1, состоит из следующих блоков:

- 1) блок питания; обеспечивает питание схемы, преобразуя напряжение бытовой сети в приемлемое для питания элементов схемы;
- 2) микроконтроллер; включает в себя непосредственно ИМС, который благодаря заданным значениям регулирует выходное напряжение и ток;
- 3) трансформатор – составляющий элемент ВИП для повышения низкого напряжения;
- 4) экран; необходим для отображения информации о текущем состоянии системы;
- 5) датчик температуры; необходим для отображения состояния контролируемого объекта;
- 6) силовой каскад; применяется для преобразования постоянного напряжения в переменное;
- 7) умножитель напряжения – составляющая схемы, предназначенная для повышения напряжения, а также выпрямления;

8) Bluetooth модуль; используется для приема-передачи информации.

Для стабильной и безопасной работы высоковольтного источника требуется точный контроль параметров: напряжения,

температуры, состояния устройства. В современных системах этот контроль обычно реализуется с помощью микроконтроллеров, сенсоров и интерфейсов связи.

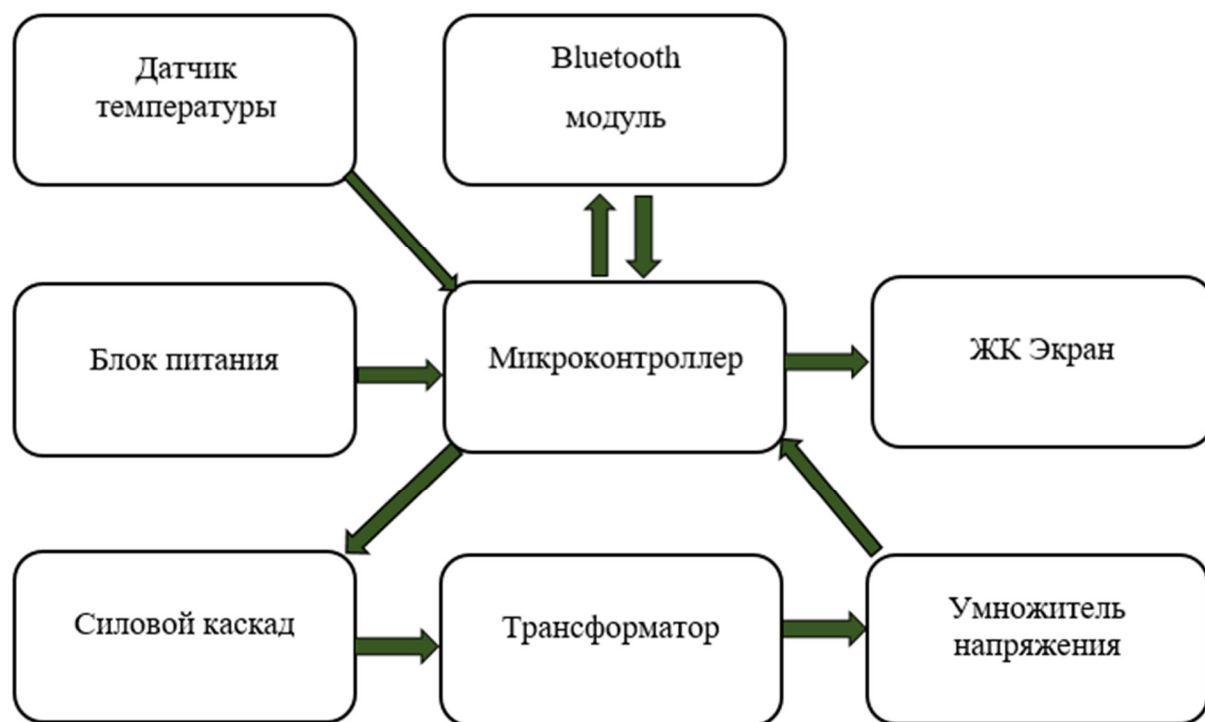


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного источника напряжения [16]

Fig. 1. Block diagram of a high-voltage voltage source [16]

Материалы и методы

Для исследования возможности реализации высоковольтного источника напряжения были применены методы моделирования электронных схем в Multisim, с ее помощью подтверждена работоспособность схемы: выходное напряжение соответствует расчётному и демонстрирует стабильную работу устройства и проектирования печатных плат Altium Designer. При помощи данной программы осуществили трассировку и 3D-моделирование печатной платы в соответствии с конструктивными и схемотехническими особенностями разрабатываемого устройства.

На базе микроконтроллера ATmega328 разработали схемотехническую структуру высоковольтного источника напряжения с цифровым управлением.

На рисунке 2 приведена схема управляющей части высоковольтного источника, которая обеспечивает:

- 1) стабилизированное питание микроконтроллера и периферии;
- 2) отображение информации о температуре;
- 3) управление и отображение состояния на ЖК-дисплее;
- 4) связь с внешними устройствами (например, Bluetooth) для мониторинга и настройки.

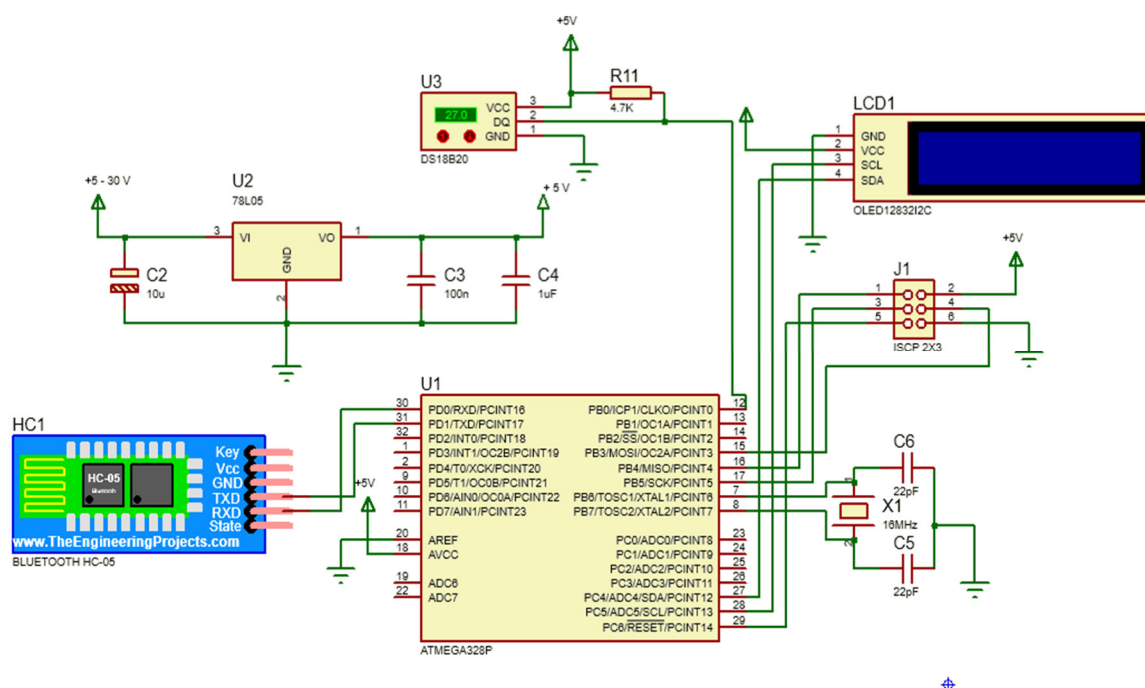


Рис. 2. Управляющая система и интерфейс высоковольтного источника

Fig. 2. Control system and interface of a high-voltage source

Микроконтроллер ATmega328P U1 – центральный элемент схемы, который управляет всей системой: обрабатывает данные с датчиков, управляет отображением информации и коммуникацией; имеет множество входов / выходов (GPIO) для подключения периферии.

Стабилизатор напряжения 78L05 U2 преобразует входное напряжение от +5 до +30 В в стабильное +5 В, необходимое для питания микроконтроллера и других компонентов, обеспечивает устойчивую работу схемы, защищая от перепадов напряжения.

Конденсаторы фильтрации C2, C3, C4–C2 (10 мкФ) сглаживают пульсации на входе стабилизатора, C3 (100 нФ) и C4 (1 мкФ) фильтруют выходное напряжение, уменьшая шумы и обеспечивая стабильное питание.

Датчик температуры DS18B20 U3 – цифровой датчик температуры. Используется для мониторинга температуры внутри высоковольтного источника, что важно для предотвращения перегрева.

Резистор R11 4,7 кОм обеспечивает правильный уровень сигнала на линии данных датчика DS18B20.

ЖК-дисплей LCD1 отображает текущие параметры работы: температуру, напряжение, ток. Подключён к микроконтроллеру по интерфейсу I2C (SCL и SDA).

Модуль Bluetooth HC-05 HC1 обеспечивает беспроводную связь с внешними устройствами (например, смартфоном или ПК), позволяет удалённо контролировать и настраивать высоковольтный источник. Подключен к микроконтроллеру через UART (TXD, RXD).

Кварцевый резонатор 16 МГц X1 и конденсаторы C5, C6 22 пФ обеспечивают стабильную тактовую частоту микроконтроллера. Кварц задаёт точный частотный опорный сигнал для работы процессора.

Разъём ISCP 2x3 J1 – интерфейс программирования микроконтроллера. Используется для загрузки прошивки и отладки.

На рисунке 3 приведена схема силовой части высоковольтного источника, которая представляет собой преобразователь напряжения с управлением силовыми

ключами (MOSFET), предназначенный для генерации высоковольтного выходного напряжения с регулировкой.

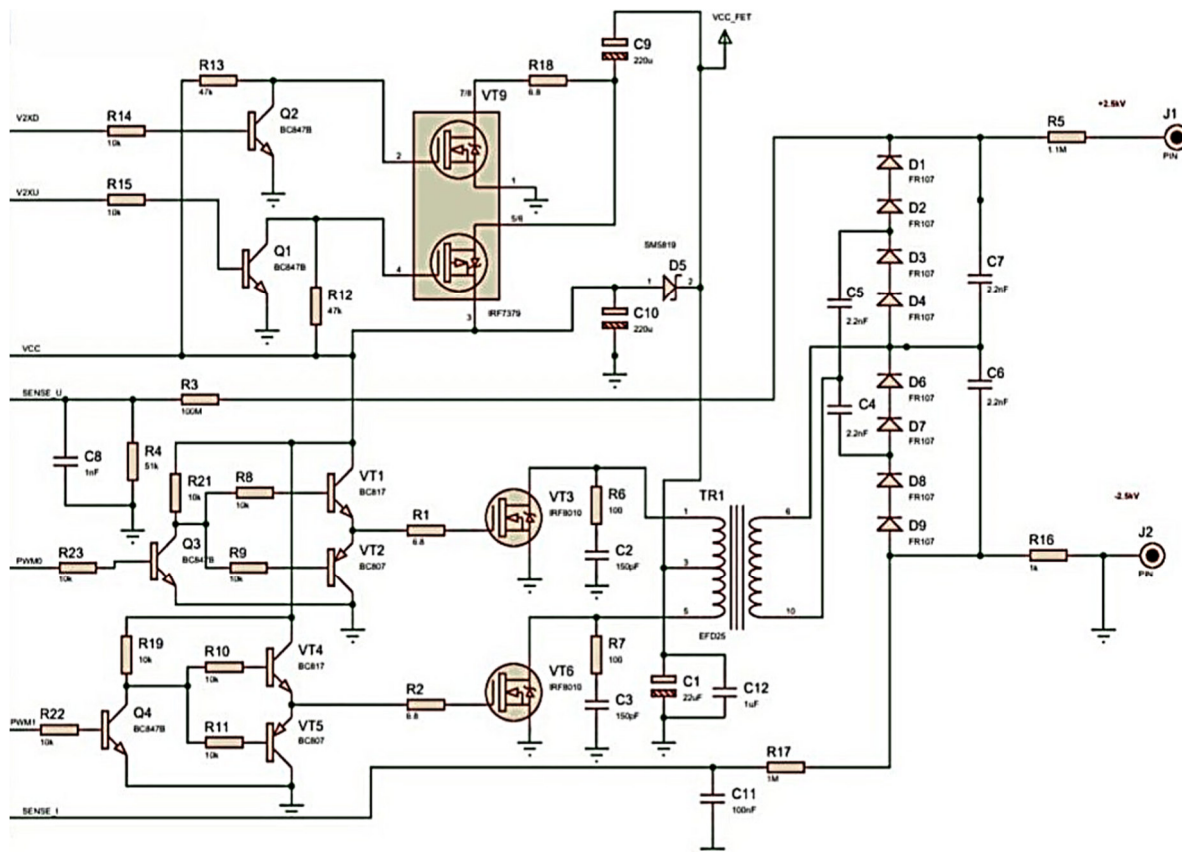


Рис. 3. Силовая часть схемы высоковольтного источника напряжения

Fig. 3. The power part of the circuit of a high-voltage voltage source

Транзисторы VT3 и VT6 (IRF8010) – это силовые P-канальные MOSFET, которые работают в ключевом режиме, переключая ток через первичную обмотку трансформатора TR1. Транзистор VT9 (IRF7379) – двойной N-канальный MOSFET, который в паре с транзисторами Q1, Q2 формирует драйвер для управления силовыми ключами (VT3, VT6).

Биполярные транзисторы Q1, Q2 (BC847B) – формирующие усилитель и инвертор для управления затворами транзистора VT9.

Резисторы R14, R15, R13, R12, R18, R23, R21, R8, R9, R10, R11, R22, R1, R2 используются для ограничения по току.

Транзисторы (VT1, VT2, VT4, VT5) составляют комплементарные пары для

формирования сигналов управления силовыми ключами, Q3, Q4 усиливают сигналы управления от входов PWM.

Трансформатор TR1 преобразует напряжение с первичной обмотки, управляемой силовыми ключами, в высоковольтное напряжение на вторичной обмотке. Обеспечивает гальваническую развязку и повышает напряжение.

Умножитель напряжения, состоящий из конденсаторов C5, C4, C6, C7 и диодов D1, D2, D3, D4, D6, D7, D8, D9, используется для преобразования постоянного напряжения, в несколько раз превышающего амплитуду входного переменного напряжения.

Резисторы R6, R7 и конденсаторы C2, C3 образуют RC-фильтр, который сглаживает пульсации напряжения. Резисторы R3, R4 формируют делитель напряжения, который понижает высокое напряжение до допустимого для подключения к МК, а конденсатор C8 применяется для фильтрации, тем самым образуют выходную цепь SENSE_U (сигнальная линия напряжения) для подключения к микроконтроллеру для

точной регулировки напряжения на выходе ИВН, а также для отображения на экран.

Резистор R17 и конденсатор C11 (для фильтрации сигнала) образуют выходную цепь SENSE_I, для того чтобы МК мог измерить ток нагрузки.

Проектирование высоковольтного источника напряжения осуществили в программе схемотехнического моделирования Multisim. Разработанная схема представлена на рисунке 4.

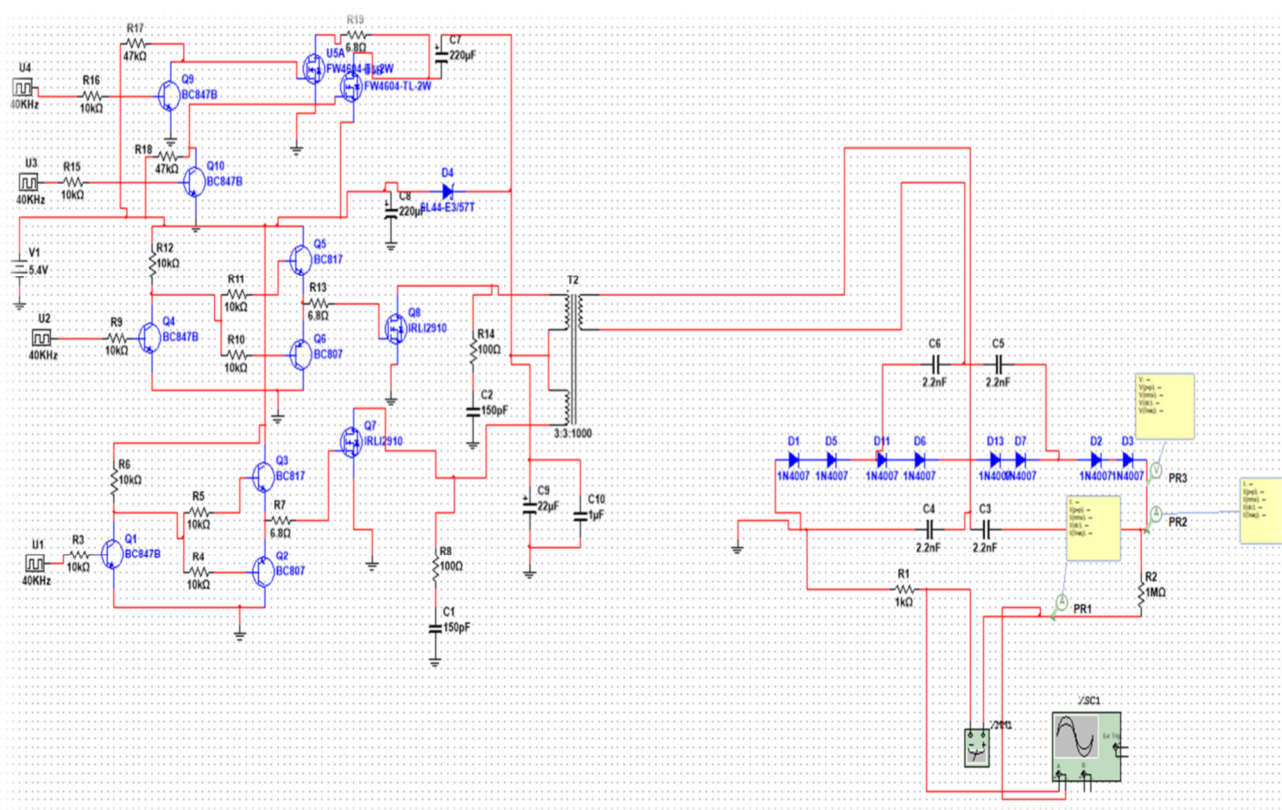


Рис. 4. Схема источника высокого напряжения в рабочем окне программы Multisim

Fig. 4. Diagram of the high voltage source in the Multisim program's operating window

В основе схемы лежит микроконтроллер Atmega 328, вместо микроконтроллера был использован компонент Digital clock, который формирует ШИМ-сигнал, далее он идет на драйвер, в нашем случае их 4, после непосредственно на силовой Mosfet. В предоставленной схеме транзисторы

Q7, Q8 образуют Push-Pull преобразователь, который используется для поочередного протекания тока через половину первичной обмотки трансформатора с центральным отводом, тем самым уменьшается напряжение на каждом транзисторе, в свою очередь, транзисторная сборка U6

формирует напряжение на центральном отводе трансформатора, также в схеме присутствуют RC-фильтры (R6-C1, R12-C2).

Результаты и их обсуждение

На рисунке 5 изображен график напряжения на выходе высоковольтного источника питания.

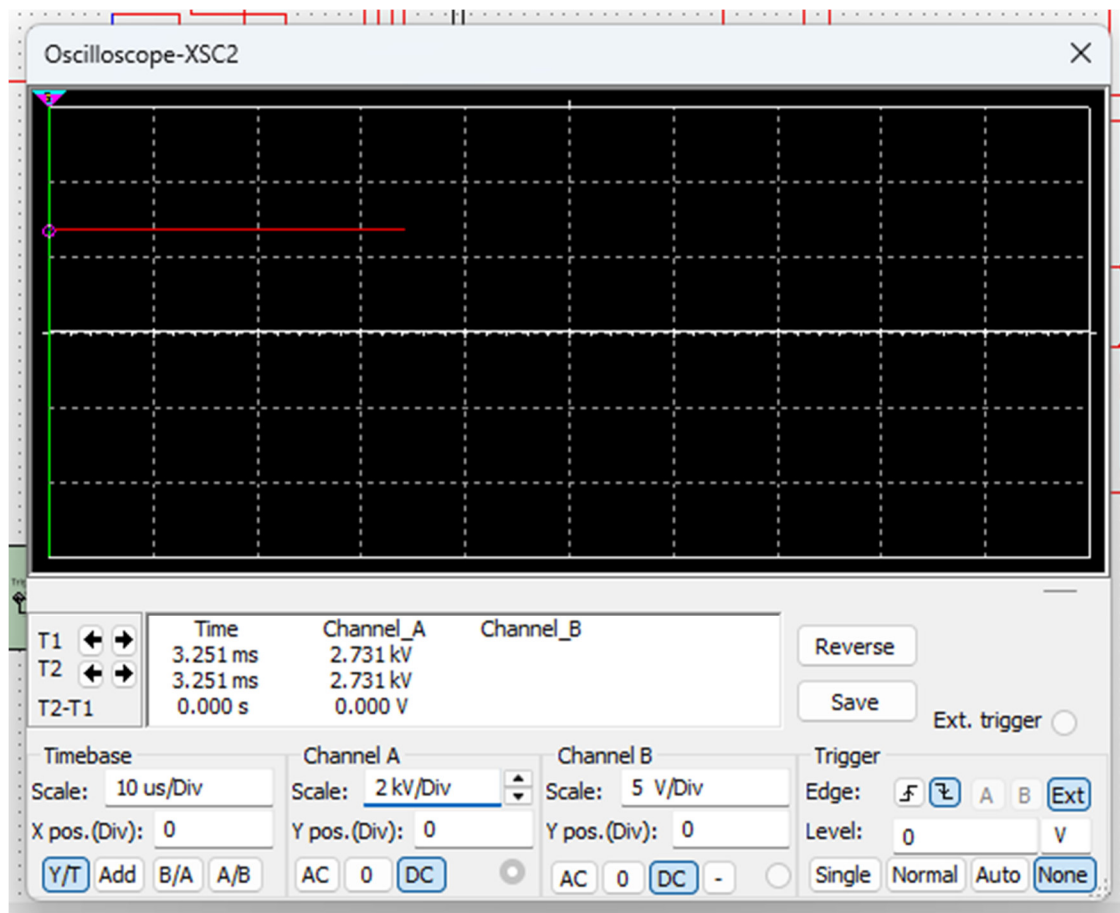


Рис. 5. Результаты моделирования схемы высоковольтного источника питания в рабочем окне программы Multisim

Fig. 5. Simulation results of a high-voltage power supply circuit in the Multisim program's working window

Наличие на выходе умножителя напряжения 2,731 кВ положительно влияет на достоверность проведенного моделирования, т. к. это значение непосредственно соответствует теоретическому напряжению холостого хода данной схемы умножения и не превышает 10%.

В соответствии с конструктивными и схематехническими особенностями раз-

рабатываемого прибора производим размещение компонентов на печатной плате и трассировку печатных проводников. Данную процедуру осуществляем с помощью программы Altium Designer. Результаты трассировки можно увидеть на рисунках 6 и 7.

Для создания модели корпуса использовалась программа AutoCAD. Результаты моделирования можно увидеть на рисунке 8.

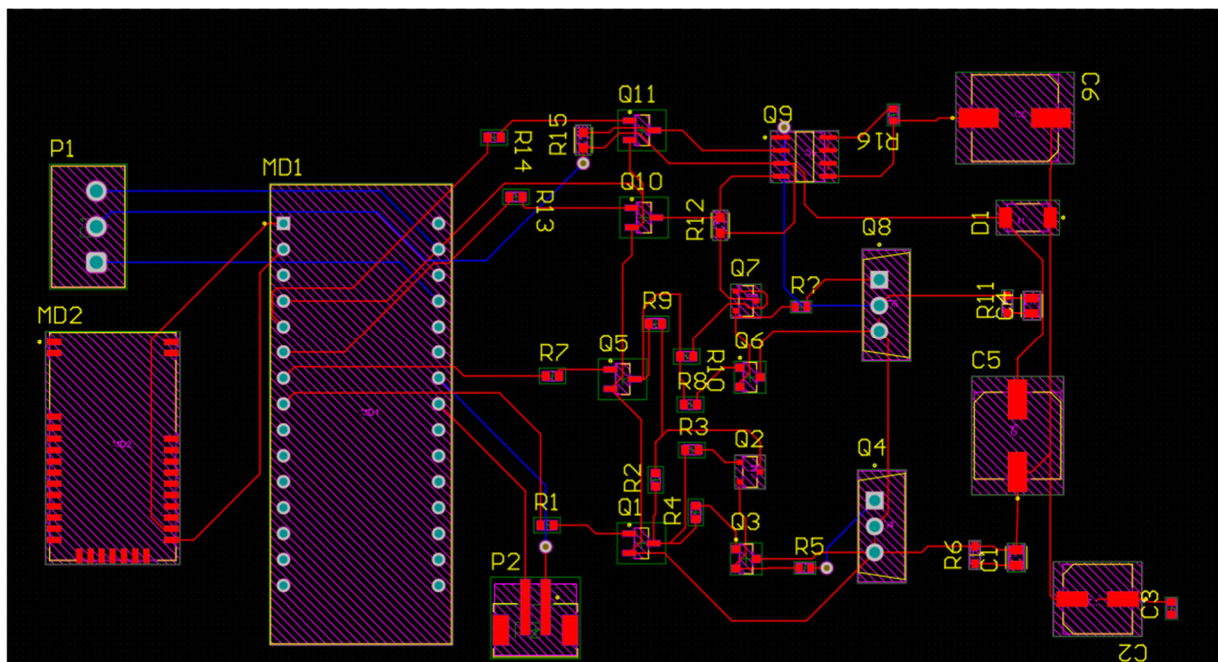


Рис. 6. Компоновка печатной платы в рабочем окне программы Altium Designer

Fig. 6. Layout of the printed circuit board in the working window of the Altium Designer program

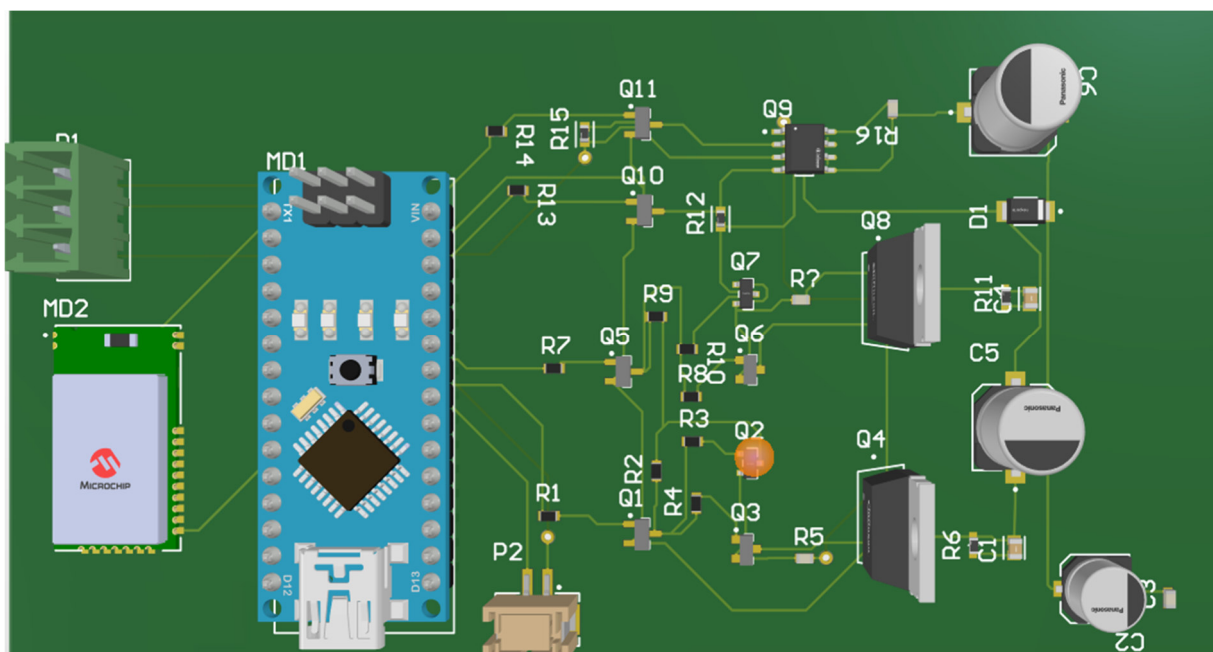


Рис. 7. 3D-модель печатной платы в рабочем окне программы Altium Designer

Fig. 7. 3D model of the printed circuit board in the working window of the Altium Designer program

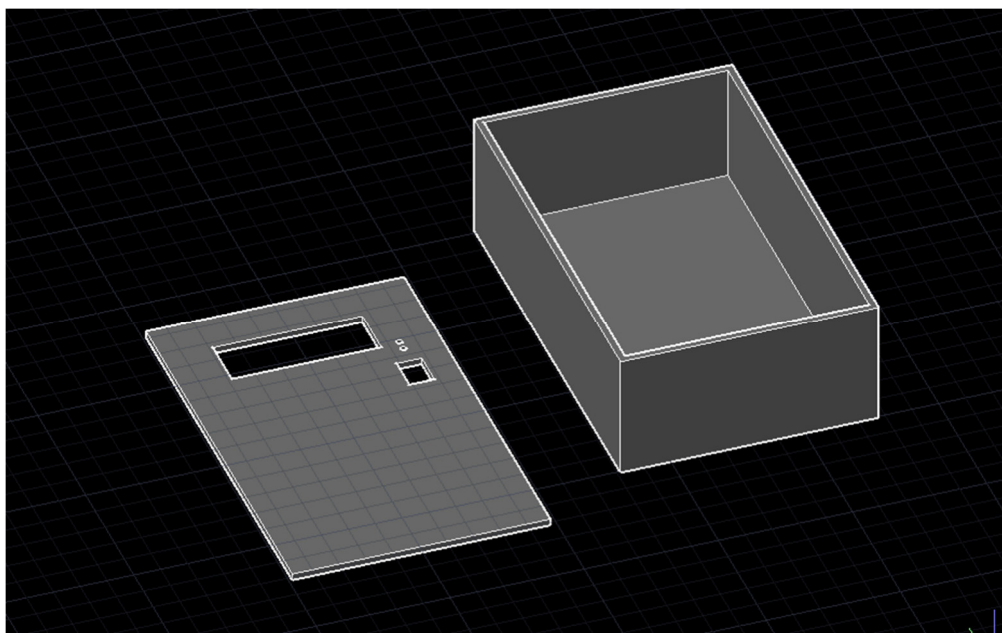


Рис. 8. 3D-модель корпуса в рабочем окне программы AutoCAD

Fig. 8. 3D-model of the case in the working window of the AutoCAD program

Программное обеспечение источника высокого напряжения реализовано на микроконтроллере ATmega328. Вся логика работы разбита на функциональные блоки: инициализация оборудования, генерация ШИМ-сигнала, измерение аналоговых величин, контроль и защита, а также передача информации. Инициализация включает настройку системного тактирования, конфигурацию портов ввода-вывода, настройку таймера для генерации ШИМ, запуск аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) для считывания сигналов с датчиков и активацию модуля UART для связи с ПК. Таймер Timer1 работает в режиме Fast PWM и выдает сигнал управления на силовой ключ преобразователя. Частота и скважность ШИМ регулируются программно, исходя из целевого выходного напряжения и измеренного обратного сигнала. Для измерения тока и напряжения используются каналы встроенного 10-битного АЦП. Сигналы поступают с делителей напряжения и токового шунта, усиленного операционным усилителем. Измерения проводятся цик-

лически с определенной частотой. Программа усредняет несколько выборок для подавления шумов, применяя простой цифровой фильтр на основе скользящего среднего. Затем значения преобразуются в физические величины с учетом коэффициентов усиления и деления. Эти данные используются для контроля, отображения и защиты.

Алгоритмы защиты реализованы следующим образом: если измеренное выходное напряжение превышает допустимый порог либо ток превышает максимально допустимое значение, программа немедленно отключает ШИМ, переводит выходной ключ в безопасное состояние и устанавливает флаг ошибки. Также реализована программная защита от короткого замыкания, перегрева и некорректной работы АЦП. Для предотвращения ложных срабатываний применяется программная гистерезисная логика и задержка подтверждения аварийного состояния.

Обмен данными с пользователем реализован по UART-интерфейсу со скоростью 9600 бод. В программу встроен про-

стой текстовый протокол: устройство может передавать текущие значения напряжения и тока, а также принимать команды управления, например, изменение заданного напряжения, включение / отключение выходного каскада, сброс ошибки. Все команды обрабатываются в основном цикле, при этом управление выходом остается прерогативой обработчиков таймера и защиты. Программа предусматривает расширение с возможностью подключения дисплея или модуля Bluetooth.

Код организован модульно. Модуль **init.c** содержит процедуры инициализации всех периферийных устройств. Модуль **pwm.c** управляет настройкой и изменением параметров ШИМ. Модуль **adc.c** отвечает за запуск и обработку АЦП, включая фильтрацию и преобразование результатов. Модуль **protection.c** реали-

зует все алгоритмы защитных срабатываний. Модуль **uart.c** содержит функции приема и передачи данных, а также обработку пользовательских команд. Главный файл **main.c** содержит основной цикл, который координирует все процессы и вызывает функции модулей по расписанию.

Для взаимодействия пользователя с высоковольтным источником питания разработано мобильное Android-приложение, обеспечивающее беспроводную связь с микроконтроллером по каналу Bluetooth. Основной задачей приложения является управление выходными параметрами источника питания (напряжением и током), а также возможность безопасного включения и выключения устройства.

На рисунке 9 представлен основной интерфейс Android-приложения для управления высоковольтным источником питания.

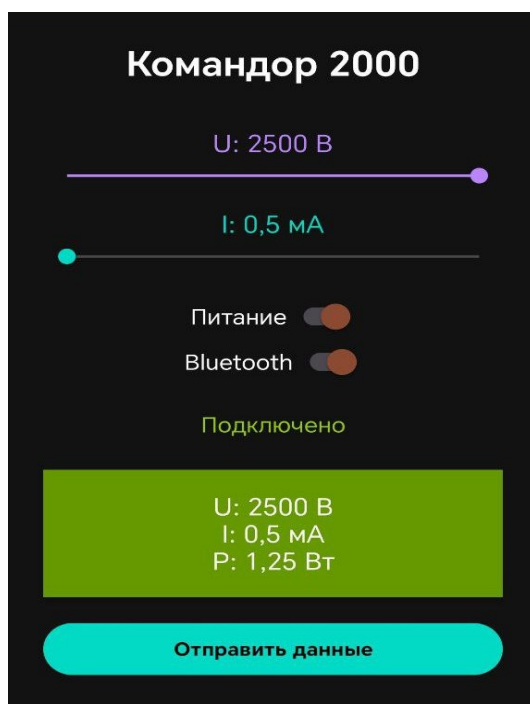


Рис. 9. Интерфейс Android-приложения

Fig. 9. Android application interface

Интерфейс выполнен в тёмной цветовой схеме для снижения утомляемости пользователя при длительной работе, а

также для повышения читаемости при эксплуатации в условиях лабораторного или производственного освещения.

На экране отображаются:

- 1) ползунки для задания напряжения и тока;
- 2) кнопка включения / отключения высоковольтного выхода;
- 3) текущие значения напряжения и тока в цифровом виде;
- 4) индикация состояния соединения Bluetooth.

Элементы интерфейса расположены таким образом, чтобы минимизировать вероятность случайного нажатия при работе с потенциально опасным оборудованием. Управление осуществляется интуитивно и не требует специальной подготовки оператора.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана полная схемотехническая структура высоковольтного источника напряжения с цифровым управлением на базе микроконтроллера ATmega328. Реализовано поузловое разбиение устройства, включающее силовую и управляющую части, а также коммуникационные и

защитные блоки. Особое внимание уделено надёжности, точности регулирования и мониторинга параметров – напряжения, тока и температуры.

С помощью среды моделирования Multisim подтверждена работоспособность схемы: выходное напряжение соответствует расчётному и демонстрирует стабильную работу устройства. В Altium Designer выполнена трассировка и 3D-моделирование печатной платы, а с помощью AutoCAD разработан корпус устройства.

Программное обеспечение реализовано с учётом требований безопасности, гибкости управления и удалённого взаимодействия по Bluetooth. Предусмотрены алгоритмы защиты от перенапряжения, перегрузки по току и перегрева, а также система обратной связи для точного контроля выходных характеристик.

Таким образом, спроектированное устройство является функциональным, безопасным и пригодным к практической реализации в составе высоковольтных систем.

Список литературы

1. Орел Е. А. Совершенствование высоковольтного источника вторичного питания, работающего на импульсную нагрузку // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 2. С. 31-40. <https://doi.org/10.18721/JEST.26203>.
2. Угловский А. С., Семеренко Ю. С. Разработка высоковольтного источника питания // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2024. Т. 68, № 4. С. 100-109. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2024.68.4.015>.
3. Development of high-power density interleaved DC/DC converter with SiC devices / T. Kitamura, M. Yamada, S. Harada, M. Koyama // *Electrical Engineering in Japan*. 2016. Vol. 196. P. 22-29. <https://doi.org/10.1002/eej.22748>.
4. Butler S. Enabling a powerful decade of changes [Flyback] // *IEEE Power Electronics Magazine*. 2019. Vol. 6. P. 18-26. <https://doi.org/10.1109/MPPEL.2018.2886103>.
5. A modified step-Up DC-DC flyback converter with active snubber for improved / C. Pesce, J. Riedemann, R. Pena, W. Jara, C. Maury, R. Villalobos // *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1-17. <https://doi.org/10.3390/en12112066>.
6. Ravi V., Lakshminarasamma N. Steady state voltage gain of flyback converters for high voltage low power applications // 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Trivandrum, India: IEEE, 2016. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914508>.
7. Barsoum N., Stanley G. Design of high voltage low power supply device // *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2015. Vol. 3, no. 1. P. 6-12. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2015.030102>.

8. DC/DC Conversion systems consisting of multiple converter modules: stability, control, and experimental verifications / W. Chen, X. Ruan, H. Yan, C.K. Tse // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. Vol. 6, no. 24. P. 1463-1474. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2012406>.
9. Design improvements for primary-side-regulated high-power flyback converters in continuous-conduction-mode / B. Keogh, B. Long, J. Leisten // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Charlotte, USA: IEEE, 2015. P. 492-497. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104395>.
10. Ravi V., Lakshminarasamma N. Modeling, analysis and implementation of high voltage low power flyback converter feeding resistive loads // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. Vol. 5, no. 54. P. 4682-4695. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2838547>.
11. Hyeok-Jin Y. High-voltage input and low-voltage output power supply for modular multilevel converter // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Busan, South Korea: IEEE, 2016. P. 157-162. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7512940>.
12. Davari P., Zare F., Ghosh A. Parallel and series configurations of flyback converter for pulsed power applications // 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore: IEEE, 2012. P. 1517-1522. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6360964>.
13. Zelnik R., Prazenica M. Multiple output flyback converter design // *Transactions on electrical engineering*. 2019. Vol. 8, no. (3). P. 32-39. <https://doi.org/10.14311/TEE.2019.3.03>.
14. Leuenberger D., Biela J. Accurate and computationally efficient modeling of flyback transformer parasitics and their influence on converter losses // 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). Geneva, Switzerland: IEEE; 2015. P. 1-10. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309194>.
15. Bielskis E., Baskys A., Sapurov M. Impact of transformer design on flyback converter voltage spikes // *Elektronika ir elektrotechnika*. 2016. Vol. 22, no. 5. P. 58-61. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.5.16345>.
16. Bielskis E., Šapurov M., Platakis A. Investigation of flyback transformer flux leakage reduction ways // *Mokslas – Lietuvos ateitis*. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 312-317. <https://doi.org/10.3846/mla.2017.1037>.

References

1. Orel E.A. Improvement of a high-voltage secondary power supply operating on an impulse load. *Materialovedenie. Energetika = Materials science. Energy*. 2020;26(2):31-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JEST.26203>.
2. Uglovskii A.S., Semerenko Yu.S. Development of a high-voltage power supply. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya = Bulletin of the Agro-industrial complex of the Upper Volga region*. 2024;68(4):100-109. (In Russ.) <https://doi.org/10.35694/YARCX.2024.68.4.015>.
3. Kitamura T., Yamada M., Harada S., Koyama M. Development of high-power density inter-leaved DC/DC converter with SiC devices. *Electrical Engineering in Japan*. 2016;196:22-29. <https://doi.org/10.1002/eej.22748>.
4. Butler S. Enabling a powerful decade of changes [Flyback]. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2019;6:18-26. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2886103>.
5. Pesce C., Riedemann J., Pena R., Jara W., Maury C., Villalobos R. A modified step-Up DC-DC flyback converter with active snubber for improved. *Energies*. 2019;12:1-17. <https://doi.org/10.3390/en12112066>.
6. Ravi V., Lakshminarasamma N. Steady state voltage gain of flyback converters for high voltage low power applications. In: *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Trivandrum, India; IEEE; 2016. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914508>.
7. Barsoum N., Stanley G. Design of high voltage low power supply device. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2015;3(1):6-12. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2015.030102>.
8. Chen W., Ruan X., Yan H., Tse C.K. DC/DC Conversion systems consisting of multiple converter modules: stability, control, and experimental verifications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;6(24):1463-1474. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2012406>.

9. Keogh B., Long B., Leisten J. Design improvements for primary-side-regulated high-power flyback converters in continuous-conduction-mode. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Charlotte, USA: IEEE; 2015. P. 492-497. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104395>.
10. Ravi V., Lakshminarasamma N. Modeling, analysis and implementation of high voltage low power flyback converter feeding resistive loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018;5(54):4682-4695. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2838547>.
11. Hyeok-Jin Y. High-voltage input and low-voltage output power supply for modular multilevel converter. In: *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. Busan, South Korea: IEEE, 2016. P. 157-162. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7512940>.
12. Davari P., Zare F., Ghosh A. Parallel and series configurations of flyback converter for pulsed power applications. In: *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Singapore: IEEE; 2012. P. 1517-1522. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6360964>.
13. Zelnik R., Prazenica M. Multiple output flyback converter design. *Transactions on electrical engineering*. 2019;8(3):32-39. <https://doi.org/10.14311/TEE.2019.3.03>.
14. Leuenberger D., Biela J. Accurate and computationally efficient modeling of flyback transformer parasitics and their influence on converter losses. In: *17th European conference on power electronics and applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. Geneva, Switzerland: IEEE; 2015. P. 1-10. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7309194>.
15. Bielskis E., Baskys A., Sapurov M. Impact of transformer design on flyback converter voltage spikes. *Elektronika ir elektrotechnika*. 2016;22(5):58-61. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.5.16345>.
16. Bielskis E., Šapurov M., Platakis A. Investigation of flyback transformer flux leakage reduction ways. *Mokslas – Lietuvos ateitis*. 2017;9(3):312-317. <https://doi.org/10.3846/mla.2017.1037>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лесных Василий Николаевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: liesnykh.00@mail.ru, ORCID: 0009-0001-5400-0431, Researcher ID: NNG-1550-2025

Vasily N. Lesnykh, Postgraduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: liesnykh.00@mail.ru, ORCID: 0009-0001-5400-0431, Researcher ID: NNG-1550-2025

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149,

Anatoly I. Zhakin, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Белов Павел Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и нанотехнологий, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: beliy2010@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-0406-4242, Researcher ID: G-3227-2013

Pavel A. Belov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: beliy2010@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-0406-4242, Researcher ID: G-3227-2013