

Научная статья
УДК 621.311.6
doi:10.35694/YARCX.2024.68.4.015

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Артем Сергеевич Угловский¹, Наталья Юрьевна Семеренко²

^{1,2}Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

¹a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

²semerenko@yarcx.ru

Реферат. Авторами статьи разработана схема обратноходового преобразователя, предназначенного для формирования высокого выходного напряжения 1500 В при относительно низком входном напряжении. Классическая схема обратноходового преобразователя была дополнена следующими элементами: измерением входного напряжения и тока, схемой управления для переключения силового транзистора и схемой удвоения напряжения на выходе преобразователя. Предлагаемый высоковольтный источник может использоваться в мобильном роботе для уничтожения сорных растений, обеспечивая эффективное применение электрического разряда на растения. Высокое напряжение создаёт условия, при которых сорные растения подвергаются электроимпульсному воздействию, что приводит к их мгновенному уничтожению без использования химических гербицидов. Для исследования работы данного обратноходового преобразователя под управлением микроконтроллера STM32F301K6T6 были использованы методы моделирования электронных схем в программе Altium Designer с последующей разработкой печатной платы и программы в интегрированной среде STMCubeIDE. Программное обеспечение состоит из трёх основных компонентов: компонента, управляющего высоковольтным источником; компонента, управляющего низковольтным источником, и компонента, обеспечивающего связь.

Ключевые слова: обратноходовой преобразователь, микроконтроллер, аналого-цифровой преобразователь, шины UART и I2C, МОП-транзистор

DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY

Artem S. Uglovskiy¹, Natalya Yu. Semerenko²

Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

¹a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

²semerenko@yarcx.ru

Abstract. The authors of the article have developed a flyback converter circuit designed to generate a high output voltage of 1500 V at a relatively low input voltage. The classic flyback converter circuit has been supplemented with the following elements: input voltage and current measurement, a control circuit for switching the power transistor, and a voltage doubling circuit at the output of the converter. The proposed high-voltage source can be used in a mobile robot for weed destruction, providing effective application of electric discharge to plants. High voltage creates conditions under which weeds are exposed to electric impulse effects, which leads to their instant destruction without the use of chemical herbicides. To study the operation of this flyback converter controlled by the STM32F301K6T6 microcontroller, methods of modeling electronic circuits in the Altium Designer program were used, followed by the development of a printed circuit board and a program in the STMCubeIDE integrated environment. The software consists of three main components: a component that controls the high-voltage source, a component that controls the low-voltage source, and a component that provides communications.

Keywords: flyback converter, microcontroller, analog-to-digital converter, UART and I2C buses, MOSFET

Введение. Переход к более эффективным и экологически чистым методам борьбы с сорными растениями в сельском хозяйстве является важной задачей для обеспечения устойчивого развития и снижения негативного воздействия на окружающую среду. В разработанном автором мобильном роботе предусмотрена функция уничтожения сорных растений в полевых условиях при помощи электроимпульсного воздействия. Этот подход помогает снизить количество вредных химических средств, улучшить состояние почвы и повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Эффективность данной методики доказал И. В. Юдаев [1],

который проанализировал динамику электрической проводимости растительной ткани. Его исследование посвящено электроимпульсному уничтожению сорных растений. Учёный разработал математическую модель, отражающую изменения электрических свойств растительных тканей при воздействии импульсов, выявив, что наибольшее электросопротивление наблюдается в корневой системе растений. Эксперименты показали, что использование высоковольтных импульсов вызывает более серьёзные повреждения в тканях сорных растений по сравнению с традиционными методами.

Вкратце, мобильный робот оснащён передней камерой для обнаружения сорных растений, а также зондом, который их уничтожает. Робот перемещается автономно с помощью RTK-приёмника. Для обнаружения и классификации сорных растений используется искусственный интеллект. Уничтожение сорных растений происходит с помощью электрического разряда, который генерируется между зондом и ближайшим листом целевого растения. Обычно для уничтожения сорных растений используются токи в диапазоне от нескольких миллиампер до нескольких десятков миллиампер при напряжении в несколько киловольт.

В представленном исследовании для формирования высокого напряжения 1500 В, управляемого микроконтроллером STM32F301K6T6, используется обратноходовой преобразователь. Обратногоходовой преобразователь является одним из наиболее распространённых типов импульсных источников питания, используемых в различных электронных устройствах. Данная топология преобразователя позволяет получать высокое выходное напряжение при относительно низком входном напряжении [2; 3].

Данная схема была выбрана ввиду её простоты и возможности реализации с помощью небольшого количества компонентов. Несмотря на отсутствие гальванической развязки, что могло бы позволить использовать более простую схему повышения напряжения, практическая реализация показала, что обратноходовой преобразователь позволяет достичь выходного напряжения, превышающего входное более чем в 30 раз.

Обратноходовой преобразователь работает следующим образом. Входное напряжение (например, 25 В) подаётся на первичную обмотку трансформатора. Микроконтроллер STM32F301K6T6 управляет силовым ключом (транзистором), который периодически замыкает и размыкает первичную обмотку трансформатора. При замыкании ключа энергия от источника питания накапливается в магнитном поле трансформатора. При размыкании ключа магнитное поле трансформатора меняется, что индуцирует высокое напряжение во вторичной обмотке, которое выпрямляется и сглаживается для получения стабильного напряжения 1500 В на выходе преобразователя.

Цель нашего исследования – разработка высоковольтного источника с применением микроконтроллерного управления в мобильных роботах с целью уничтожения при помощи электроимпульсного воздействия сорных растений в полевых условиях.

Данная разработка имеет меньшие размеры и вес, что позволяет интегрировать её в мобильные роботы, ориентированные на агрономические задачи. Высоковольтные источники, используемые в лабораторных условиях и для экспериментальных установок, обычно более громоздки, требуют сложного управления и не всегда подходят для мобильных решений.

Классическая схема обратноходового преобразователя была дополнена следующими элементами:

- 1) измерение входного напряжения и тока;
- 2) схема управления для переключения силового транзистора;
- 3) схема удвоения напряжения на выходе преобразователя.

Высоковольтный источник, подающий высокое напряжение на зонд с целью уничтожения сорных растений, разрабатывается для использования его в мобильном роботе. В научных исследованиях, проведённых авторами [4], установлено, что для эффективного уничтожения сорных растений с помощью электроимпульсной обработки достаточно применения напряжения в диапазоне от 1500 до 2000 В. Однако в работах других исследователей [5] фиксируется использование напряжений, в два раза превышающих указанные значения. В таких случаях возникает необходимость дополнительного преобразования напряжения с использованием конденсаторов и диодов для достижения необходимого уровня электрического воздействия на сорные растения.

После успешного завершения лабораторных испытаний планируется проверить работу высоковольтного источника в реальных условиях и оценить его действенность в уничтожении сорных растений.

Материалы и методы исследований. Для исследования работы обратноходового преобразователя на 1500 В под управлением микроконтроллера STM32F301K6T6 были использованы следующие методы. Моделирование работы электронных схем производилось в программе Altium Designer с целью получения анализа переходных процессов и расчёта параметров. Создано программное обеспечение для микроконтроллера в интегрированной среде разработки STMCubeIDE компании STMicroelectronics.

В качестве трансформатора был выбран FL2810-1L, характеризующийся малыми габаритами и высоким коэффициентом трансформации.

Для измерения входного напряжения использован простой делитель напряжения, дополненный стабилитроном, который защищает аналого-цифровой вход микроконтроллера от перенапряжения. Для измерения тока обратноходового преобразователя применена интегральная схема измерителя тока верхнего плеча INA180. В зависимости от подтипа схемы он имеет разное фиксированное усиление ($A = 50$) и обеспечивает аналоговый выходной сигнал, который оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Ожидаемая величина тока, протекающего через шунтирующий резистор, можно определить из расчётов, выполненных на обратноходовом преобразователе.

Управление ключевым полевым транзистором осуществляется с помощью схемы на основе NPN и PNP-транзисторов, управляемых ШИМ-сигналом микроконтроллера. Данное решение позволяет повысить скорость переключения за счёт более высокого напряжения на затворе транзистора.

Во время высокого логического уровня сигнала FET_DRV (рис. 1) транзистор T1 открывается, поэтому напряжение на затворе МОП-транзистора T2 становится ~ 9 В. При низком логическом уровне транзистор T3 открывается, а T1 закрывается, тем самым замыкая затвор на землю. Преимущество такого решения по сравнению с прямым управлением микроконтроллера состоит в том, что за счёт более высокого напряжения VGS сопротивление канала уменьшается, а внутренние ёмкости МОП-транзистора заряжаются и разряжаются быстрее, за счёт чего сокращается время включения и выключения.

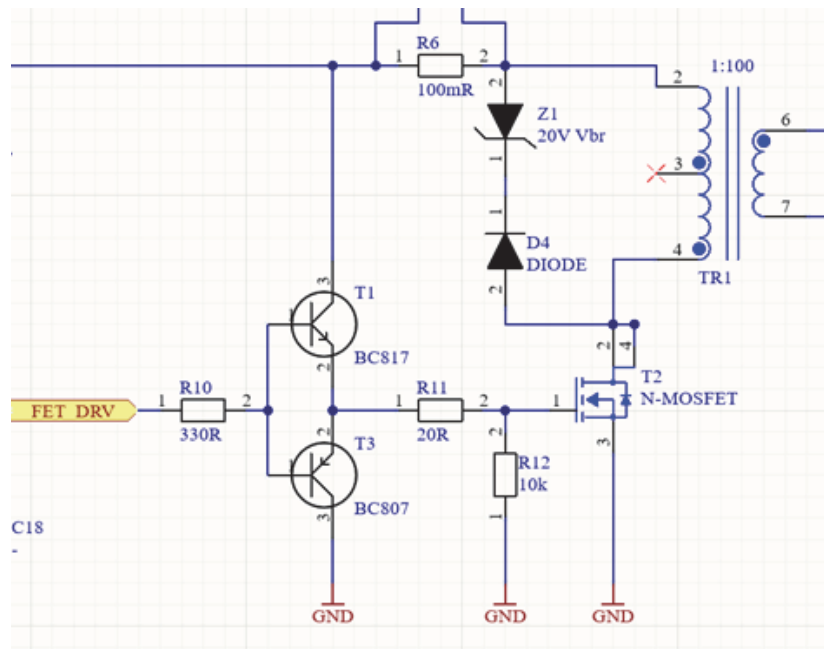


Рисунок 1 – Схема драйвера полевого транзистора

На рисунке 2 показан обратноходовой преобразователь, разработанный в Altium Designer.

Обратноходовой трансформатор имеет свойство, характерное только для этого типа трансформаторов, – способность за время прямого хода запасать энергию, на обратном ходу отдавая энергию в нагрузку. По сути, его можно назвать дросселем.

При проектировании обратноходового трансформатора необходимо задать максимальный пиковый ток в первичной обмотке I_{pk} , который влияет на потери в ключе. Кроме того, пропорционально току в первичной обмотке возрастает ток во вторичной обмотке, и это приводит к увеличению потерь в выпрямителе.

Принцип работы данной схемы следующий.

Входное напряжение (+VIN) подаётся на фильтр, состоящий из конденсаторов C8, C9, C10, C20. Этот фильтр сглаживает пульсации входного напряжения.

Цепочка Z1, D4 (TVS-демпфер, применение диода и супрессора) уменьшает импульсные выбросы, возникающие вследствие коммутации индуктивности первичной обмотки трансформатора.

Нагрузкой выходного каскада служит импульсный трансформатор T1, который на прямом ходе запасает энергию в сердечнике, а на обратном через диод VD1 отдаёт её в нагрузку.

Отфильтрованное напряжение поступает на первичную обмотку трансформатора TR1 через ключевой

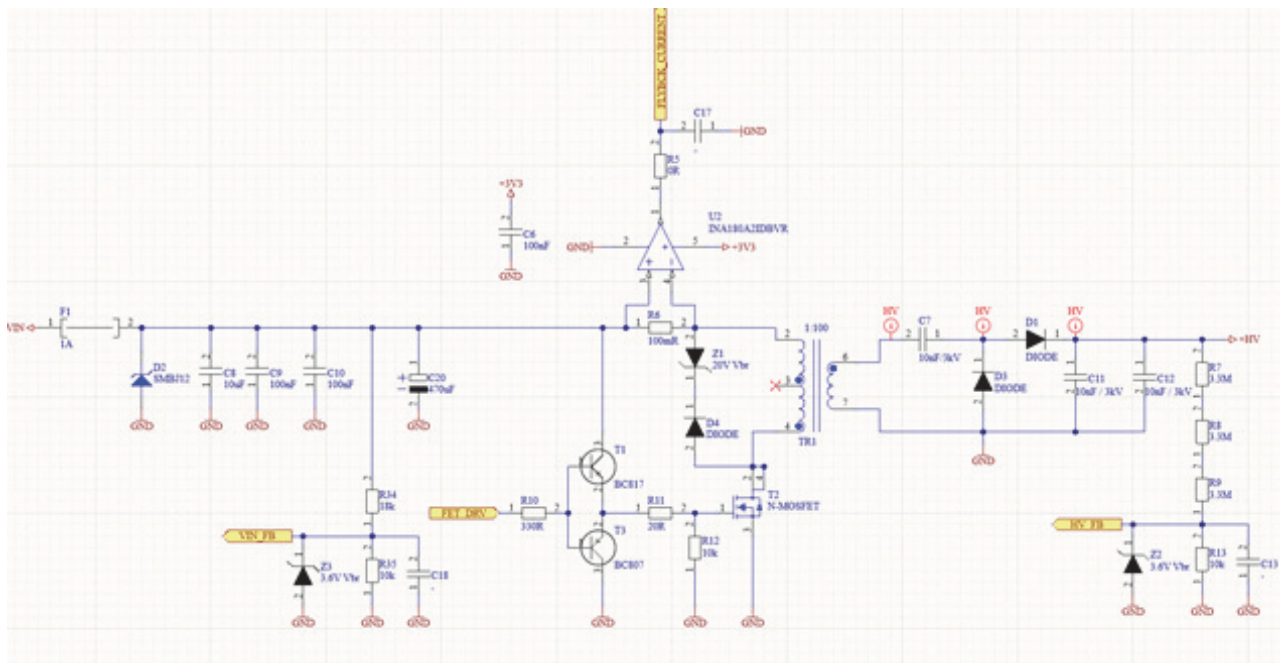


Рисунок 2 – Обратноходовой преобразователь

транзистор Т2. Транзистор Т2 управляется сигналами от микроконтроллера U1.

Когда транзистор Т2 открывается, ток протекает через первичную обмотку трансформатора TR1, накапливая энергию в магнитном поле. Когда транзистор Т2 закрывается, энергия, накопленная в магнитном поле, передаётся на вторичную обмотку трансформатора, формируя высокое напряжение +HV.

Схема удвоения напряжения состоит из двух диодов (D1, D3) и двух конденсаторов (C7, C11). Если требуется повысить высоковольтное напряжение в 4 раза, уже используются четыре диода и четыре конденсатора.

Высокое напряжение +HV фильтруется и стабилизируется с помощью RC-цепочек, состоящих из резисторов R14-R21 и конденсатора C12.

Для контроля выходного напряжения +HV используется делитель напряжения, состоящий из резисторов R7-R9. Сигнал с этого делителя поступает на вход микроконтроллера U1 для обратной связи и регулирования выходного напряжения.

Для защиты от перенапряжения используются диоды Зенера Z1-Z3.

Микроконтроллер U1 управляет работой всей схемы, формируя необходимые сигналы для ключевого транзистора Т2 и осуществляя контроль выходного напряжения.

В данном исследовании программно-управляемый источник питания имеет диапазон напряжений 25–40 В с максимальным током нагрузки ~10 мА. Важным требованием является обеспечение высокой стабильности выходного напряжения источника.

Для реализации данной задачи целесообразно использовать схему с последовательно включёнными транзисторами. Однако, поскольку максимальный выходной ток настолько мал, более простым решением может быть применение операционного усилителя.

В предлагаемой схеме цифро-аналоговый выход микроконтроллера подключается к неинвертирующему входу операционного усилителя через фильтр нижних частот (рис. 3). Усиление регулируется путём обратной связи между выходом усилителя и его инвертирующим входом. Несмотря на то, что потребление электрод-

ной системы зонда робота невелико, необходимо использовать буферные конденсаторы, что может привести к возбуждению операционного усилителя. Для решения этой проблемы устанавливается небольшой последовательный резистор между выходом операционного усилителя и буферными конденсаторами [6–9].

Выходное напряжение U_{det} измеряется с помощью аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера, что позволяет компенсировать ошибки усиления в процессе работы.

$$U_{det} = U_{dac} \cdot \left(1 + \frac{R_{31}}{R_{32}}\right) \quad (1)$$

Конденсаторы C14, C15, C16 и C19 – это фильтрующие конденсаторы, обеспечивающие стабилизацию напряжений питания различных частей схемы.

Резисторы R29, R30, R31, R32 и R33 образуют делитель напряжения, который позволяет контролировать и регулировать выходное напряжение преобразователя.

При выборе микроконтроллера учитывались следующие параметры:

- 1) не менее четырёх 12-битных аналогово-цифровых каналов, время выборки не менее 1 мкс.;
- 2) минимум один 12-битный цифро-аналоговый преобразователь;
- 3) шины UART и I2C для управления;
- 4) ШИМ-каналы.

По этим параметрам выбран микроконтроллер STM32F301K6T6, имеющий 15 аналогово-цифровых каналов. Время преобразования одного канала составляет 0,2 мкс. Он имеет цифро-аналоговый преобразователь и внутренний компаратор. В микроконтроллере имеется 9 таймеров, каждый из которых способен генерировать ШИМ. Микроконтроллер был запрограммирован через шину SWD с использованием среды разработки STMCubeIDE.

Микроконтроллер STM32F301K6T6 управляет обратнoходoвым преобразователем (flyback) следующим образом (рис 4). Микроконтроллер генерирует ШИМ-сигнал с помощью встроенных таймеров и ШИМ-

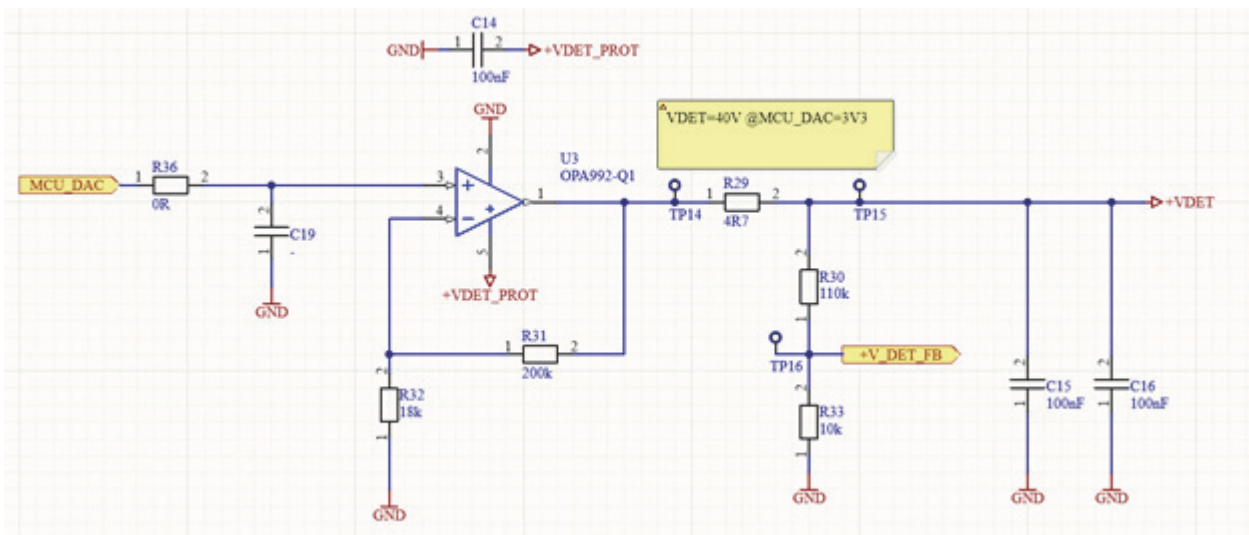


Рисунок 3 – Источник питания низкого напряжения

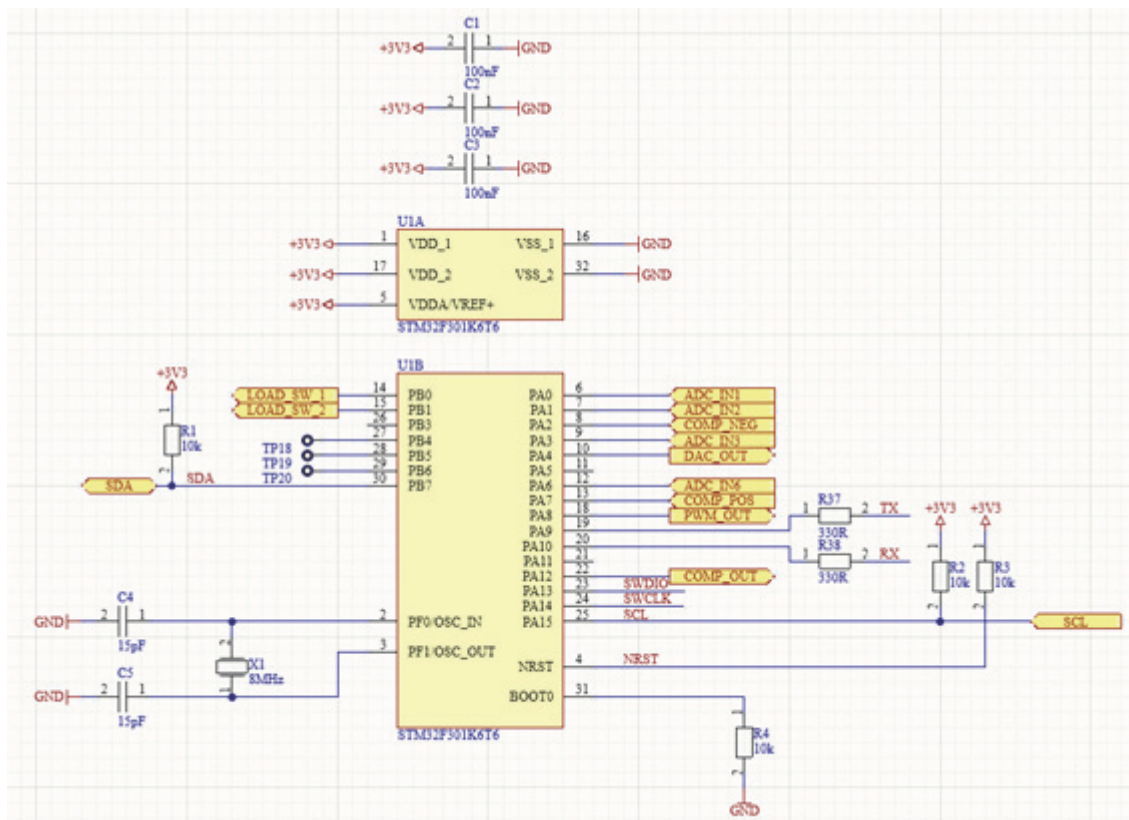


Рисунок 4 – Микроконтроллерное управление

модулей. ШИМ-сигнал используется для управления ключевым транзистором (T2) в обратном преобразователе.

Контроль обратной связи осуществляется следующим образом. Микроконтроллер получает информацию об выходном напряжении преобразователя через делитель напряжения (R29, R30). Данная информация используется для регулирования ШИМ-сигнала и поддержания стабильного выходного напряжения.

Защита от перегрузок и коротких замыканий: микроконтроллер отслеживает ток и напряжение в преобразователе через датчики тока и напряжения (INA180A2IDBVR). При возникновении перегрузок или коротких замыканий микроконтроллер отключает ключевой транзистор для защиты схемы. Микроконтроллер управляет включением и выключением преобразователя через сигнал NRST.

Кварцевый резонатор X1 (8 МГц) обеспечивает стабильную тактовую частоту для микроконтроллера, необходимую для корректной работы.

Конденсаторы C1, C2 и C3 (по 100 нФ) выполняют функцию фильтрации и сглаживания питающего напряжения, поступающего на микроконтроллер.

Конденсаторы C4 и C5 (по 15 пФ) являются частью схемы подключения кварцевого резонатора к микроконтроллеру, обеспечивая стабильную работу генератора.

Резисторы R1, R2, R3 и R4 (по 10 кОм) выполняют роль подтягивающих резисторов для входов/выходов микроконтроллера, обеспечивая корректные логические уровни. Резисторы R37 и R38 (по 330 Ом) служат для ограничения тока и защиты выходов микроконтроллера.

Контакты P1 (Header 7x2) обеспечивают внешние подключения к преобразователю для подачи входного напряжения.

В ходе проектирования не ставилась задача минимизации размеров платы, однако были соблюдены разумные ограничения по её габаритам. Итоговая конструкция представляла собой двухслойную плату размером 90x65 мм.

При разработке принципиальной схемы особое внимание уделялось распределению компонентов и проводников между слоями. Верхний слой содержал большую часть элементов и проводящих дорожек, в то время как нижний слой преимущественно использовался для сплошного заземления. Кроме того, для высоковольтных компонентов было увеличено расстояние между проводниками, что способствовало повышению надёжности и безопасности устройства.

Предложенное техническое решение позволило достичь поставленных целей по упрощению сборки и измерений, не жертвуя при этом разумными ограничениями по размеру платы и обеспечивая необходимый уровень надёжности. Печатная плата высоковольтного источника показана на рисунке 5.

Результаты. Для выбора компонентов преобразователя необходимо рассчитать ряд параметров [10–14]:

- 1) выходной ток – I_{ki} ;
- 2) выходное напряжение – U_{ki} ;
- 3) выходная ёмкость силового ключа – C ;
- 4) максимальное напряжение диода – I_{dmax} ;
- 5) энергия, запасённая в трансформаторе – E_{st} ;
- 6) максимальный ток и напряжение переключения

– I_{kmax} , U_{kmax} .

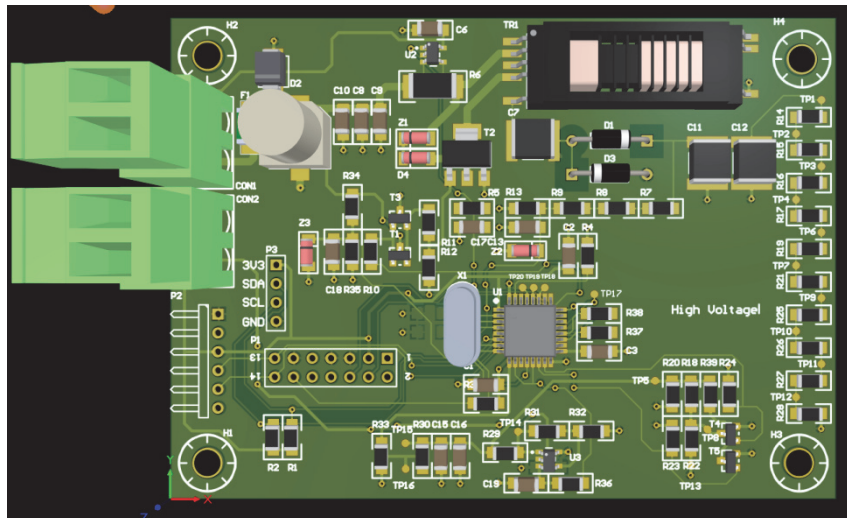


Рисунок 5 – Печатная плата высоковольтного источника

КПД преобразователя:

$$d_{max} = \frac{U_{kimax}}{U_{kimax} + a_t \cdot U_{be}} = \frac{1000B}{1000B + 100 \cdot 9B} = 0,5263.$$

$$E_{st} = \frac{L_1 I_{kmax}^2}{2}. \quad (3)$$

$$C = \frac{I_{kimax} \cdot t_{bemax}}{\Delta U_{ki}} = \frac{2 \text{ mA} \cdot 17,54 \text{ мкс}}{2V} \approx 20 \text{ нФ}.$$

$$\Delta I_L = \frac{U_{be}}{a_t \cdot L_1} \cdot t_{bemax} = \frac{9V}{100 \cdot 420 \text{ мкГн}} \cdot 17,54 \text{ мкс} = 3,75 \text{ mA}.$$

$$I_{dmax} = \frac{1}{1-d} \cdot I_{kimax} + \frac{\Delta I_L}{2} = 6,1 \text{ mA}.$$

$$U_{dmax} = a_t \cdot U_{be} + U_{kimax} = 1900 \text{ V}.$$

$$I_{kmax} = a_t \cdot I_{dmax} = 610 \text{ mA}.$$

$$U_{kmax} = U_{be} + \frac{U_{ki}}{a_t} = 19 \text{ V}.$$

$$\eta = \frac{U_{ki} \cdot I_{ki}}{U_{be} \cdot I_{FETRMS} + P_Z + P_{FET} + P_{Feedback}}, \quad (2)$$

На рисунке 6 показаны расчётные зависимости КПД от тока нагрузки (I_{ki}) для рассмотренного выше примера.

Основные параметры: R_t – сопротивление нагрузки, U_{be} – напряжение базы, a_t – коэффициент усиления транзистора, f – частота, L_1 – индуктивность первичной обмотки трансформатора, r_{ds} – сопротивление транзистора.

Расчёт промежуточных величин: d – коэффициент заполнения, t_{be} – длительность включения транзистора, d_{II} – изменение тока индуктивности, I_d – ток стока транзистора, I_k – ток коллектора транзистора, I_{fetrms} – среднеквадратичное значение тока транзистора, P_{fet} – мощность потерь в транзисторе, P_z – мощность потерь в индуктивности, $P_{feedback}$ – прочие потери мощности (на управление, в демпфирующих цепях).

На рисунке 7 показана диаграмма напряжения полевого транзистора на его стоке. Рассчитаем ток,

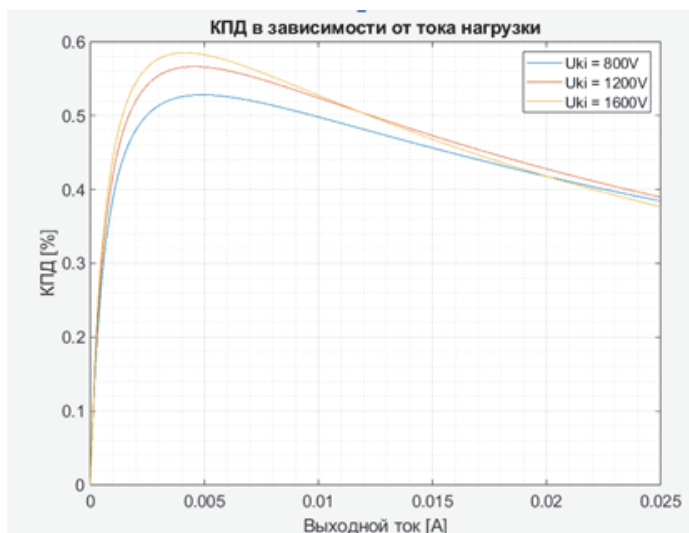


Рисунок 6 – КПД в зависимости от тока нагрузки

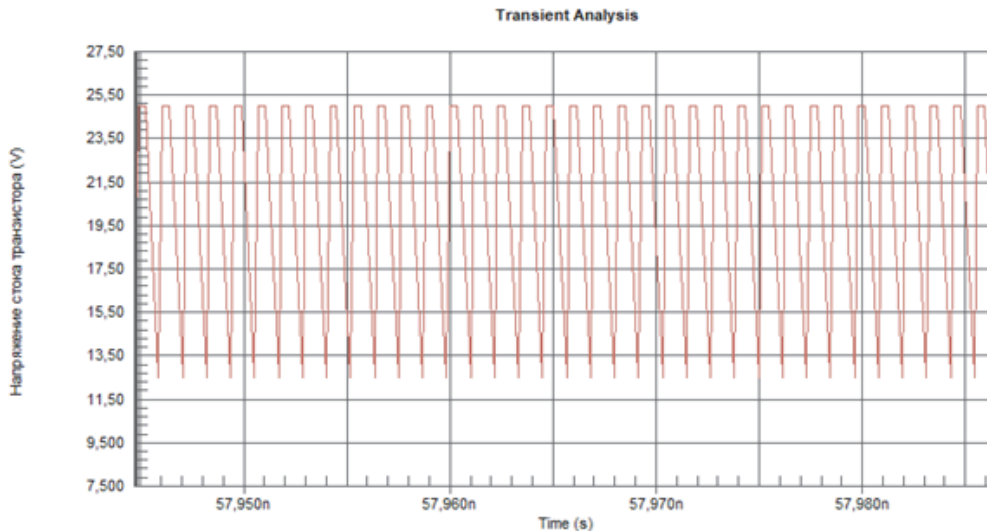


Рисунок 7 – Напряжение силового ключа T2 обратноходового преобразователя

потребляемый схемой управления для переключения силового транзистора.

Включается транзистор, когда напряжение на его стоке примерно равно входному напряжению (в нашем случае 9 В). При этом суммарный заряд его переключения (из графика в спецификации) составит примерно 6 нКл. Выключается транзистор при нулевом напряжении (из-за влияния паразитной ёмкости трансформатора и самого транзистора), и здесь важен лишь заряд переключения затвора – порядка 3,3 нКл.

Соответственно, ток на включение транзистора составит $Q_G \cdot f_{SW} = 6 \text{ нКл} \cdot 100 \text{ кГц} = 0,6 \text{ мА}$, а на выключение – $3,3 \text{ нКл} \cdot 100 \text{ кГц} = 0,33 \text{ мА}$. Таким образом, суммарный ток, потребляемый схемой управления, составит 1 мА.

Авторам статьи создано программное обеспечение в интегрированной среде разработки STMicroelectronics. Программное обеспечение (рис. 8) состоит из трёх основных компонентов:

компонента, управляющего высоковольтным источником; компонента, управляющего низковольтным источником, и компонента, обеспечивающего связь.

Периферийные устройства можно настроить через графический интерфейс, предоставляемый средой разработки, что значительно упрощает процесс.

Вовремя настройки сначала необходимо установить правильный тактовый сигнал для микроконтроллера, затем после настройки интерфейса отладки загрузить код в микроконтроллер и протестировать работу.

Данная программа представляет собой управление обратноходовым преобразователем на базе микроконтроллера STM32F301K6T6. Ниже представлены основные функции программы (рис. 9).

1) Инициализация периферийных устройств (ADC, DAC, I2C, UART, таймеры):

- настройка ADC для измерения входного напряжения;
- настройка DAC для управления выходным напряжением;



Рисунок 8 – Графический интерфейс конфигурации STM32CubeIDE

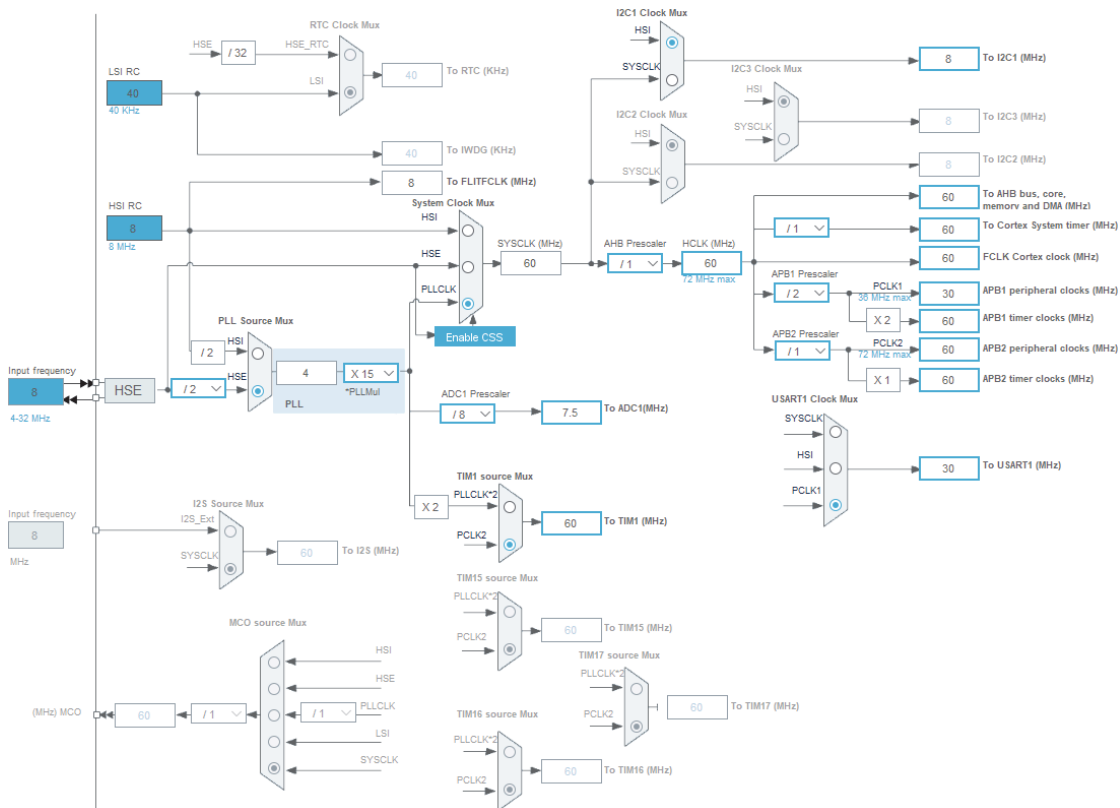


Рисунок 9 – Настройка тактовой сети микроконтроллера

– настройка I2C и UART для связи с внешними устройствами;

– настройка таймеров для генерации ШИМ-сигнала и периодического вызова обработчика прерывания.

2) Реализация ПИД-регулятора для управления выходным напряжением:

– вычисление ошибки между заданным и измеренным напряжением;

– расчёт управляющего воздействия с помощью ПИД-алгоритма;

– ограничение выходного сигнала в пределах допустимого диапазона.

3) Обработка команд, поступающих через UART-интерфейс:

- установка значения ЦАП;
- получение значения ЦАП;
- управление цифровым выходом;
- установка значения ШИМ-сигнала;
- установка опорного напряжения;
- периодическое обновление выходного ШИМ-сигнала в соответствии с ПИД-регулятором.

Основная идея работы программы заключается в поддержании стабильного выходного напряжения на уровне заданного значения с помощью ПИД-регулятора. Измерение входного напряжения осуществляется с помощью АЦП, а управление выходным напряжением производится через ЦАП и ШИМ-сигнал. Кроме того, программа обеспечивает возможность удалённого управления и мониторинга параметров через UART-интерфейс.

Реализация ПИД-алгоритма:

$$\text{float integrator} = K_PD \cdot K_ID \cdot x_err;$$

$$v = v + \text{integrator} + K_PD \cdot (x_err - x_err_prev),$$

где K_PD – коэффициент пропорциональной составляющей ПИД-регулятора; K_ID – коэффициент интегральной составляющей ПИД-регулятора; x_err – текущая ошибка; x_err_prev – предыдущая ошибка; v – выходное значение ПИД-регулятора.

Пропорциональная составляющая вычисляется как $K_PD \cdot (x_err - x_err_prev)$, интегральная составляющая – $K_PD \cdot K_ID \cdot x_err$, а выходное значение v обновляется с учётом этих составляющих.

Выводы. Проведённые исследования показали, что разработанный обратногодовой преобразователь на 1500 В под управлением микроконтроллера STM32F301K6T6 работает в соответствии с ожидаемыми характеристиками:

- 1) выходное напряжение составляет 1500 В при входном напряжении 25 В;
- 2) пульсации выходного напряжения не превышают 1% от номинального значения;
- 3) суммарный ток, потребляемый схемой управления, составляет 1 мА;
- 4) температура основных компонентов находится в допустимых пределах.

В схему преобразователя интегрированы дополнительные элементы: измерение входного напряжения и тока, а также схема управления силовым транзистором. Это обеспечивает мониторинг и контроль режимов работы преобразователя.

В целом, представленная работа демонстрирует разработку высоковольтного источника питания на основе обратногодового преобразователя под управлением микроконтроллера, что может найти применение в различных электронных устройствах, требующих формирования высокого напряжения.

Список источников

1. Юдаев И. В. Обоснование технологических параметров электроимпульсного уничтожения сорной растительности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Азово-Черноморский инженерный институт. М., 2002. 24 с. EDN VFYMOX.
2. Васюков И. В. Высоковольтный источник питания на основе инвертора напряжения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 1 (165). С. 85–88. EDN OPAGCH.
3. Вьюхин В. Н. Высоковольтный усилитель // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 52–54. DOI 10.31857/S0032816219060259. EDN HNBQXJ.
4. Brighenti A., Brighenti D. M. Weed control in organic soybean using electrical discharge // *Ciência Rural*. 2009. Vol. 39 (8). P. 2315–2319.
5. Schreier H., Bish M., Bradley K. The Impact of Electrocutation Treatments on Weed Control and Weed Seed Viability in Soybean // *Weed Technology*. 2022. Vol. 36, Is. 4. P. 481–489. DOI <https://doi.org/10.1017/wet.2022.56>.
6. Орел Е. А. Совершенствование высоковольтного источника вторичного питания, работающего на импульсную нагрузку // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 2. С. 31–40. DOI 10.18721/JEST.26203. EDN RXYBVM.
7. Подвызников В. А., Чевокин В. К. Высоковольтный лабораторный источник питания // *Приборы и техника эксперимента*. 2013. № 6. С. 116. DOI 10.7868/S0032816213060232. EDN REKCLP.
8. Редлих К. А., Чернецкий И. А., Семёнов В. Д. Высоковольтный источник вторичного питания на основе полумостового инвертора напряжения // *Электронные средства и системы управления : материалы докладов Международной научно-практической конференции*. 2022. № 1-1. С. 168–171. EDN OONGJV.
9. Чмиль А. И., Наumenко А. В. Импульсный источник высокого напряжения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 1 (16). С. 8–12. EDN WYLZAR.
10. Шешунова Е. В., Шмигель В. В., Угловский А. С. Расчёт высоковольтного источника питания для электротехнологических установок // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2022. № 1 (57). С. 77–85. DOI 10.35694/YARCX.2022.57.1.012. EDN QRKKKZ.
11. Keogh B., Long B., Leisten J. Design improvements for Primary-Side-Regulated high-power flyback converters in Continuous-Conduction-Mode // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2015. P. 492–497. DOI 10.1109/APEC.2015.7104395.
12. Khomich V. Yu., Moshkunov S. I., Rebrov I.E. Multiphase high-voltage high-frequency sawtooth wave generator // *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2016. P. 919–923. DOI 10.1109/SPEEDAM.2016.7525962.
13. Hyeok-Jin Y. High-Voltage Input and Low-Voltage Output Power Supply for Modular Multi-Level Converter // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2016. P. 157–162. DOI 10.1109/ITEC-AP.2016.7512940.
14. 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). P. 4682–4695. DOI 10.1109/TIA.2018.2838547.

References

1. Yudaev I. V. Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov elektroimpul'snogo unichtozheniya sornoj rastitel'nosti : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.20.02 / Azovo-Chernomorskij inzhenernyj institut. M., 2002. 24 s. EDN VFYMOX.
2. Vasyukov I. V. Vysokovol'tnyj istochnik pitaniya na osnove invertora napryazheniya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2012. № 1 (165). S. 85–88. EDN OPAGCH.
3. V'yukhin V. N. Vysokovol'tnyj usilitel' // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2020. № 1. S. 52–54. DOI 10.31857/S0032816219060259. EDN HNBQXJ.
4. Brighenti A., Brighenti D. M. Weed control in organic soybean using electrical discharge // *Ciência Rural*. 2009. Vol. 39 (8). P. 2315–2319.
5. Schreier H., Bish M., Bradley K. The Impact of Electrocutation Treatments on Weed Control and Weed Seed Viability in Soybean // *Weed Technology*. 2022. Vol. 36, Is. 4. P. 481–489. DOI <https://doi.org/10.1017/wet.2022.56>.
6. Orel E. A. Sovershenstvovanie vysokovol'tnogo istochnika vtorichnogo pitaniya, rabotayushchego na impul'snuyu nagruzku // *Materialovedenie. Energetika*. 2020. T. 26, № 2. S. 31–40. DOI 10.18721/JEST.26203. EDN RXYBVM.
7. Podvyaznikov V. A., Chevokin V. K. Vysokovol'tnyj laboratornyj istochnik pitaniya // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2013. № 6. S. 116. DOI 10.7868/S0032816213060232. EDN REKCLP.
8. Redlikh K. A., Chernetskij I. A., Semenov V. D. Vysokovol'tnyj istochnik vtorichnogo pitaniya na osnove polumostovogo invertora napryazheniya // *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya : materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2022. № 1-1. S. 168–171. EDN OONGJV.
9. Chmil' A. I., Naumenko A. V. Impul'snyj istochnik vysokogo napryazheniya // *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016. № 1 (16). S. 8–12. EDN WYLZAR.
10. Sheshunova E. V., Shmigel' V. V., Uglovskij A. S. Raschyot vysokovol'tnogo istochnika pitaniya dlya elektrotekhnologicheskikh ustanovok // *Vestnik APK Verhnevzh'ya*. 2022. № 1 (57). S. 77–85. DOI 10.35694/YARCX.2022.57.1.012. EDN QRKKKZ.
11. Keogh B., Long B., Leisten J. Design improvements for Primary-Side-Regulated high-power flyback converters in Continuous-Conduction-Mode // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2015. P. 492–497. DOI 10.1109/APEC.2015.7104395.
12. Khomich V. Yu., Moshkunov S. I., Rebrov I.E. Multiphase high-voltage high-frequency sawtooth wave generator // *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2016. P. 919–923. DOI 10.1109/SPEEDAM.2016.7525962.

13. Hyeok-Jin Y. High-Voltage Input and Low-Voltage Output Power Supply for Modular Multi-Level Converter // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). 2016. P. 157–162. DOI 10.1109/ITEC-AP.2016.7512940.

14. 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). P. 4682–4695. DOI 10.1109/TIA.2018.2838547.

Сведения об авторах

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Наталья Юрьевна Семеренко – старший преподаватель кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет».

Information about the authors

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Agrarian University”, spin-code: 3717-5731.

Natalya Yu. Semerenko – senior lecturer of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Agrarian University”.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

