

Научная статья

УДК 621.373.14

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>

Высоковольтный генератор барьерных разрядов: моделирование и экспериментальная проверка

Олег Валерьевич Гусев*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва,
Рыбинск, Россия*

Аннотация. Описана модель силовой части устройства, используемого для генерации плазменного барьерного разряда при атмосферном давлении в газоразрядном промежутке. Модель состоит из силовой части, высоковольтного трансформатора, а также системы управления. Модель реализована с использованием средств физического моделирования. В статье приведены результаты как моделирования, так и проведенного эксперимента по получению плазменных барьерных разрядов.

Ключевые слова: барьерный разряд, холодная плазма, высокочастотный трансформатор, Simscapе-модель, физическое моделирование, мостовая топология

Для цитирования: Гусев О. В. Высоковольтный генератор барьерных разрядов: моделирование и экспериментальная проверка // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 21–34. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>.

Original article

A high-voltage barrier discharge generator: Modeling and experimental verification

Oleg V. Gusev*Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia*

Abstract. The paper describes a power unit model of a device generating a plasma barrier discharge at atmospheric pressure in a gas-discharge gap. This model includes a power unit, a high-voltage transformer, and a control system, which are all produced using physical simulation tools. The research presents both the modeling results and the experiment findings of obtaining dielectric barrier discharges.

Keywords: barrier discharge, cold plasma, high-frequency transformer, Simscape, physical simulation, full-bridge topology

For citation: Gusev O. V. A high-voltage barrier discharge generator: Modeling and experimental verification. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):21–34. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-3>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе представлена модель силового инвертора, служащего для формирования импульсов с крутым фронтом и способного возбуждать барьерный разряд в газах разного состава (а также непосредственно в воздухе) при атмосферном давлении. Барьерный разряд является популярным источником для получения холодной плазмы [1, 2]. Холодная, или неравновесная, плазма пред-

ставляет собой слабоионизированный газ, в котором температура электронов выше температуры тяжелых ее компонентов (ионов, нейтральных частиц). При этом температура такой плазмы нередко близка к комнатной и не превышает нескольких сотен градусов Цельсия [3]. Степень ионизации холодной плазмы оценивают соотношением:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_n} \ll 1,$$

где n_i – плотность заряженных частиц, $n_i + n_n$ – плотность заряженных и нейтральных частиц (в частицах на кубический метр).

Холодная плазма используется в области биомедицины для стерилизации ран и заживления тканей [4], в промышленности для обработки полимерных материалов [5, 6], в микроэлектронике для травления и осаждения пленок. К преимуществам холодной плазмы можно отнести, например, возможность ее генерации при атмосферном давлении, что позволяет избавиться от использования вакуумной техники. Низкая температура генерируемой плазмы не повреждает термочувствительные материалы при их обработке.

Для получения плазмы барьерного разряда используются плоскопараллельные конфигурации, показанные на рис. 1. При плоской геометрии электродов барьерный разряд осуществляют в газовом зазоре воздушного зазора. В зависимости от применения ширина разрядного зазора варьируется от долей миллиметра (<0,1 мм) в ячейках плазменных

панелей до нескольких миллиметров в установках производства озона [7]. В качестве диэлектрика используют стекло, кварцевое стекло, слюду, керамику или тонкие слои полимерных материалов. Наличие диэлектрического барьера означает, что для работы такого разряда необходимо переменное напряжение, так как диэлектрик не может проводить постоянный ток. В этом случае ток проводимости в межэлектродном промежутке (разрядный узел) обеспечивается током смещения через диэлектрический барьер.

Конструкция и геометрия узла, где формируется разряд, выбирают в зависимости от решаемой задачи. Конфигурация с «плавающим» диэлектриком (см. рис. 1а), когда между двумя электродами помещается диэлектрический материал, применяется в задачах обработки полимеров, тканей и нетканых материалов. Плоскопараллельные конфигурации (см. рис. 1б, в) с диэлектриком, расположенным на одном или обоих электродах, широко используются в физических экспериментах и задачах обработки поверхностей [7].

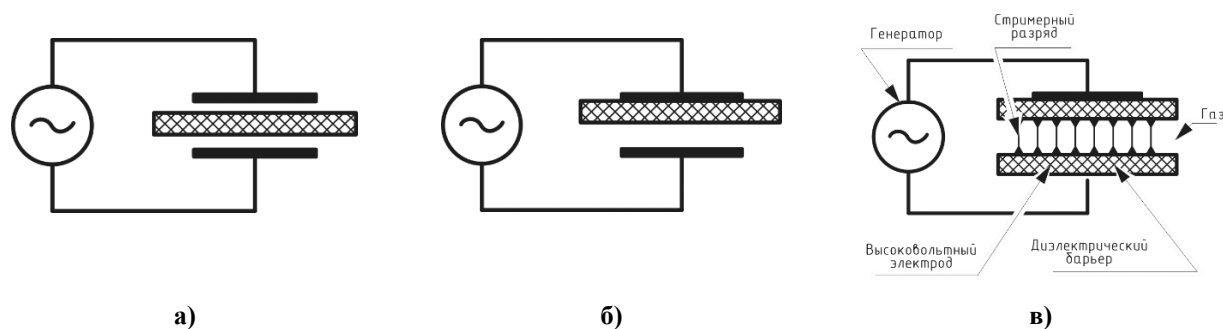


Рис. 1. Плоскопараллельная конфигурация барьерного разряда при разном размещении пластины диэлектрического материала:

- а) конфигурация с «плавающим» диэлектриком;
- б) плоскопараллельная конфигурация с одним барьером;
- в) симметричная плоскопараллельная конфигурация с двумя барьерами

Примечание: составлено автором на основании источника [7].

Диэлектрическая проницаемость и толщина барьера вместе со скоростью изменения приложенного напряжения (dU/dt) определяют величину тока смещения, проходящего через диэлектрический барьер. Напряженность электрического поля в разрядном промежутке должна быть достаточной для пробоя газа. В связи с тем что на высоких частотах

токоограничивающий эффект диэлектрика снижается для создания неравновесной плазмы, к электродам прикладывают синусоидальное или импульсное напряжение с частотой от 50 Гц до 10 МГц [7, 8]. Амплитуда импульсов не превышает 10 кВ. Исследование [9] показывает, что барьерные разряды в воздухе при атмосферном давлении горят в плоскости

электродов в виде множества плазменных разрядов (филаментов), которые плотно распределяются по газоразрядному промежутку. При этом отдельные разряды фиксируются на осциллограмме напряжения в виде резких всплесков, каждый из которых соответствует пробоем воздушного промежутка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходя из вышесказанного, модель устройства для генерации плазмы барьерного разряда должна включать в себя блок формирования сигналов управления, силовой модуль, а также блок, который будет отвечать за увеличение амплитуды импульсов, поступающих

на разрядное устройство. В связи с тем что частота переменного электрического поля варьируется в широких пределах, в качестве генератора управляющих импульсов с крутым фронтом целесообразно использовать микропроцессор. Сигналы управления с микропроцессора поступают на блок силового модуля и далее на высокочастотный трансформатор, который осуществляет усиление импульсов по амплитуде. Так как в устройстве есть слаботочная часть управления и силовой модуль, то между ними необходимо предусмотреть гальваническую развязку. Блок-схема системы генерации барьерных разрядов приведена на рис. 2.

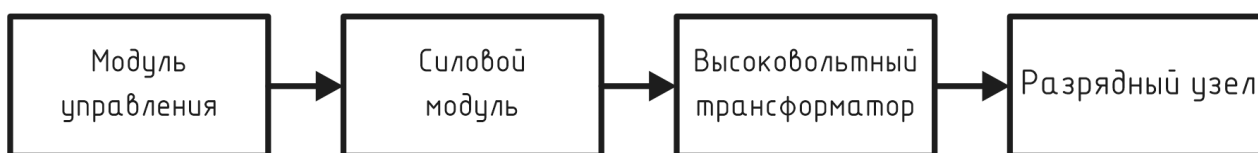


Рис. 2. Структурная схема модели генерации барьерных разрядов

Примечание: составлено автором.

Силовой модуль состоит из ключевых элементов, которые соединены по определенной схеме. При выборе топологии силового модуля рассматривались резонансные схемы мостовых и полумостовых LLC-преобразователей (Full-Bridge, Half-Bridge), а также схемы импульсных преобразователей с повышающим трансформатором. Резонансные схемы хорошо подходят для генерирования высоких напряжений на резонансной частоте. Настройка на резонанс осуществляется путем изменения частоты и скважности управляющих импульсов. К недостаткам резонансных преобразователей можно отнести их чувствительность к изменению параметров нагрузки, так как при неустойчивости барьерного разряда эффективность резонансного режима снижается [10, 11].

Альтернативой резонансных преобразователей являются импульсные схемы с полумостовой и мостовой топологией силовых ключей (Half-Bridge и Full-Bridge соответственно). В сочетании с высокочастотными трансформаторами данные схемы широко применяются в системах генерации барьерного разряда, особенно в промышленных озонаторах, плазменных установках и коронных разрядниках [12].

В результате анализа литературы и данных источника [13] предпочтение было отдано мостовой топологии (Full-Bridge) импульсного преобразователя.

В качестве ключевых элементов схемы в импульсных преобразователях используются гибридные Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) – транзисторы и полевые транзисторы с изолированным затвором (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) [13]. MOSFET-транзисторы, по сравнению с IGBT, больше подходят в качестве ключевых элементов для силового модуля, так как могут работать на более высоких частотах преобразования. К недостаткам MOSFET можно отнести более низкое значение коммутируемого напряжения (V_{DS}) по сравнению с IGBT (для MOSFET-транзисторов типовое значение $V_{DS} = 600$ В, для IGBT $V_{DS} > 1\ 200$ В [14]). Однако данный недостаток не является существенным, так как предполагается, что питание силового модуля будет осуществляться от однофазной сети переменного тока, поэтому коммутируемое напряжение не будет превышать $= 340$ В.

На рис. 3 показаны принципиальные схемы одного плеча полумоста и полумостовая схема (Half-Bridge) силового модуля соответственно. Моделирование и расчет элементов силового модуля выполнен в соответствии с рекомендациями, данными в [15]. Цепь состоит из силового MOSFET-ключа (элемент VT на рис. 3а), пассивной снабберной RC-цепи, резистора в цепи затвора R_g и обратного диода (элемент VD на рис. 3а). Резистор R_{gs} подключается между затвором и истоком MOSFET-транзистора и необходим для разряда затвора в случае обрыва соединения со схемой управления (драйвером). Последнее может привести к короткому замыканию в схеме, так как MOSFET-транзистор может оказаться в открытом состоянии). Типичное значение резистора, рекомендуемое производителями [15], $R_{gs} = 10\text{--}15$ кОм. В силовых схемах RC-снаббер защищает MOSFET-транзисторы от перенапряжений, возникающих из-за индуктивности монтажа и проводников питания. Резистор R_g служит для ограничения тока затвора MOSFET-транзистора и регулирует время переключения. Типичные значения данного резистора лежат в диапазоне $R_g = 4,7\text{--}100$ Ом и в общем случае корректируются во время эксперимента. Малые значения R_g ведут к ускорению переключения транзистора, и тем самым уменьшаются потери, однако возникает риск увеличения выбросов напряжения; увеличение величины R_g приво-

дит к демпфированию выбросов напряжения, но увеличивает время переключения ключа, что приводит к росту динамических потерь. Оптимальные значения R_g можно определить исходя из выражения [16]:

$$R_g = \frac{V_{DR} - V_{TH}}{I_{GPEAK}}, \quad (1)$$

где V_{DR} – напряжение питания схемы управления (драйвера) [В], V_{TH} – пороговое напряжение открытия MOSFET-транзистора [В], I_{GPEAK} – пиковый ток затвора [А].

Пиковый ток затвора I_{GPEAK} может быть вычислен исходя из справочных данных к конкретному MOSFET-транзистору и определялся исходя из выражения [16]:

$$I_{GPEAK} = \frac{Q_G}{t_r}, \quad (2)$$

где Q_G – полный заряд затвора MOSFET-транзистора [Кл], t_r – необходимое время включения MOSFET-транзистора [с].

В ряде случаев для защиты затвора полевого MOSFET-транзистора параллельно резистору R_{gs} устанавливают быстродействующий стабилитрон или двунаправленный TVS-диод. Их основная функция – поглощение всплесков напряжения, возникающих при быстрой коммутации транзистора в индуктивных цепях, а также ограничение напряжения, подаваемого на затвор от схемы управления.

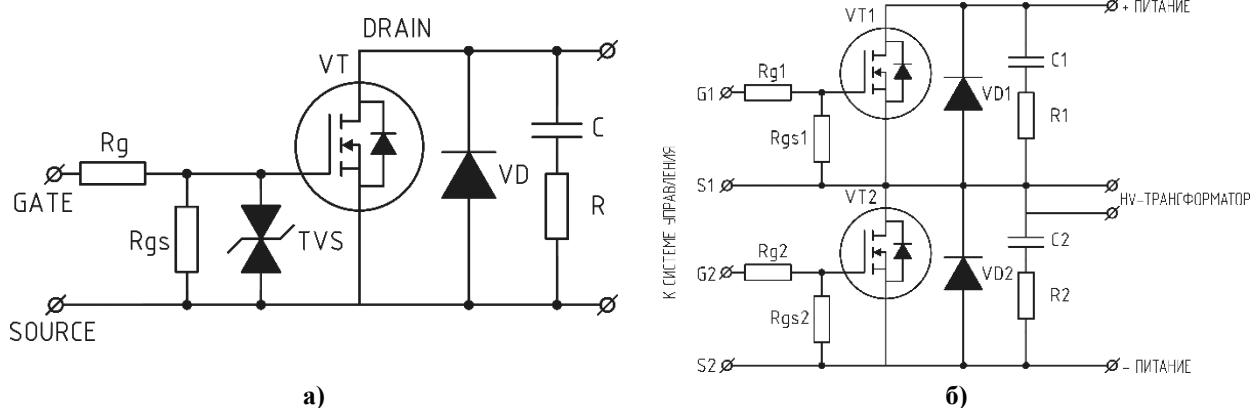


Рис. 3. Схема силового модуля системы генерации барьерного разряда:
 а) схема одного плеча полумоста с RC-снаббером;
 б) полумостовая (Half-Bridge) схема системы генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

Снабберная цепь. Когда силовой прибор резко выключается, энергия, запасенная в паразитной индуктивности цепи питания, рассеивается на ключевом элементе, вызывая выброс напряжения. Амплитуда этого напряжения пропорциональна величине паразитной индуктивности и скорости спада тока. Для устранения данных выбросов используются пассивные RC-цепи (снабберы). Снабберные цепи обеспечивают оптимальную защиту от переходных напряжений при нормальных процессах включения и выключения MOSFET-транзистора. Их применение позволяет повысить быстродействие системы, сохраняя рабочие параметры в пределах допустимой области безопасной работы. Для вычисления значений параметров RC-цепи (величины снабберного сопротивления R и емкости C) отталкиваются от того, что постоянная времени снаббера T_s должна быть как минимум в 3–4 раза ниже периода рабочей частоты:

$$T_{sw} > (3-4) \cdot RC,$$

где R – сопротивление снаббера [Ом], C – емкость снаббера [Ф].

Схема управления. Схема управления MOSFET-транзисторами (драйвер) преобразует логические импульсы, поступающие от микропроцессора, в управляющие. Микросхема драйвера обеспечивает достаточный ток для гарантированного открытия и закрытия MOSFET-транзистора. Величина положительных импульсов управления, подаваемых на затворы MOSFET-транзисторов, лежит в пределах 12–18 В [14]. В связи с тем что в мостовой схеме поочередно работают (включены) два транзистора, импульсы управления должны подаваться по двум отдельным управляющим каналам, сдвинутые по времени относительно друг друга (рис. 4а), с наличием пауз (dead-time) для устранения сквозных токов. Время dead-time (t_{DT}) не должно превышать времени включения (t_{rise}), выключения (t_{fall}) и времени задержки работы самой драйверной микросхемы (t_{prop}):

$$t_{DT} \geq t_{prop} + \frac{t_{fall} - t_{rise}}{2}.$$

Типичные значения величины t_{DT} зависят от микросхемы и лежат в диапазоне 50–500 нс (например, для драйверов Infineon, IR2104, IR2110).

При выборе среды моделирования силовой схемы инвертора основной акцент был на достоверности получаемых результатов. Последнее достигается применением физических принципов моделирования, то есть когда модели строятся на базе физических компонентов (полупроводники, пассивные элементы, двигатели). Все элементы соединяются между собой так же, как и в реальной схеме, то есть применяется топологическое моделирование. Перечисленным требованиям отвечает среда Simscape Electrical, являющаяся расширением Simulink/Simscape [17]. Моделирование силовых полупроводниковых элементов, а также иных пассивных компонентов схемы в среде Simscape Electrical осуществляется путем соединения соответствующих блоков модели между собой, то есть отвечает принципам топологического моделирования. Возможность задания нелинейных вольт-амперных характеристик элементов модели, которые соответствуют реальным компонентам схемы, позволяет максимально точно проанализировать поведение модели и сравнить ее с реальной схемой. На рис. 4б показана модель драйвера управления полумостовой схемой с реализацией времени задержки (dead-time) в среде Simscape Electrical. Блок модели Controlled PWM Voltage (см. рис. 4б) генерирует PWM-сигнал с заданной скважностью и частотой. Величина времени задержки t_{DT} задается через параметры драйвера (блок Half-Bridge Driver, рис. 4б).

Опторазвязка схемы управления (микроконтроллера) и силовой части системы генерации барьерного разряда осуществляется с применением быстродействующей оптопары. Модель оптопары в системе SIMULINK состоит из светодиода на стороне схемы управления и фототранзистора, который выдает импульсы управления на силовой модуль (см. рис. 5).

Прямоугольный PWM-сигнал на оптопару (блок Optocouper на рис. 5) поступает от источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией (блок Controlled PWM Voltage

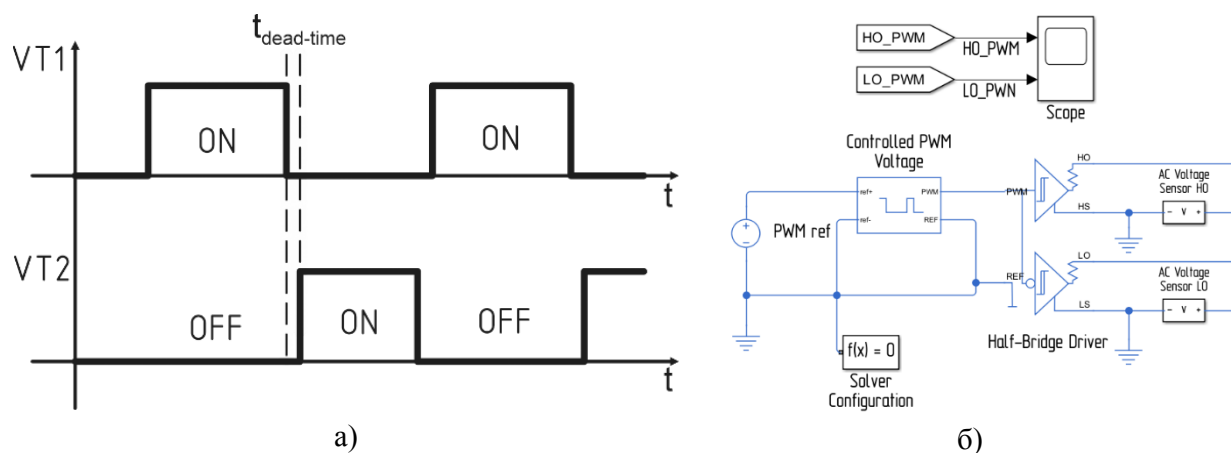


Рис. 4. Модель системы управления и результаты моделирования:
 а) диаграммы управляющих импульсов с наличием временем задержки (dead-time);
 б) Simscape-модель системы управления полумостового драйвера с реализацией dead-time
 Примечание: составлено автором.

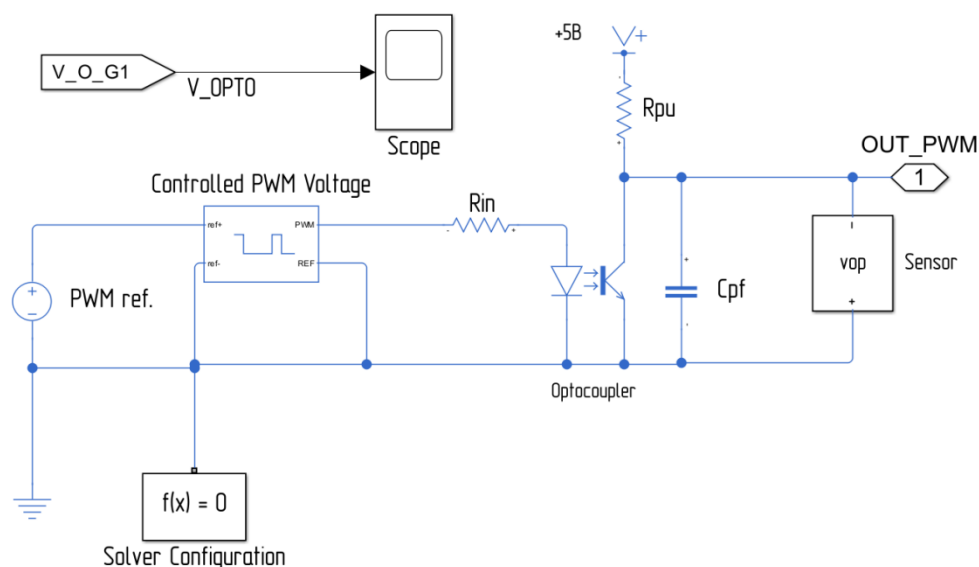


Рис. 5. Simscape-модель системы управления с блоком гальванической развязки на основе оптопары
 Примечание: составлено автором.

на рис. 5а). Данный блок генерирует импульсы с фиксированной амплитудой напряжения, заданной скважностью и частотой. Входной ограничивающий резистор (блок Rin на рис. 5) ограничивает ток светодиода. Его значение определяется исходя из выражения:

$$R_{IN} \geq \frac{V_{CC} - V_{FD}}{I_{FO}},$$

где V_{CC} – напряжение питания микросхемы [В], V_{FD} – падение напряжения на светодиоде [В], I_{FO} – ток светодиода [А].

Величина сопротивления блока Rin для моделирования задавалась равной 470 Ом как

наиболее близкой к реальной ситуации. Подтягивающий резистор (блок Rpu на рис. 5) используется для моделирования устройств с открытым стоком. Его типичные значения варьируются от 1 до 10 кОм (в модели величина этого сопротивления задавалась равной 10 кОм). В качестве PWM-сигнала использовался меандр с частотой 10 кГц и амплитудой 5 В. Модель оптрона в системе SIMULINK, как было сказано выше, в своем составе содержит диод, который имеет внутреннюю паразитную емкость pn-перехода (junction capacitance). Паразитная емкость pn-перехода приводит к возникновению импульсов напряжения. Для

их устранения в модели используется блок фильтра на основе конденсатора (блок Crf на рис. 5, значение для модели задавалось равное 47 pF и оценивалось на основе проведенных исследований).

Силовая схема. Блочная Simscape-модель силовой части системы (рис. 6) совпадает по компонентам с принципиальной схемой силового модуля системы генерации барьерного разряда (см. рис. 3).

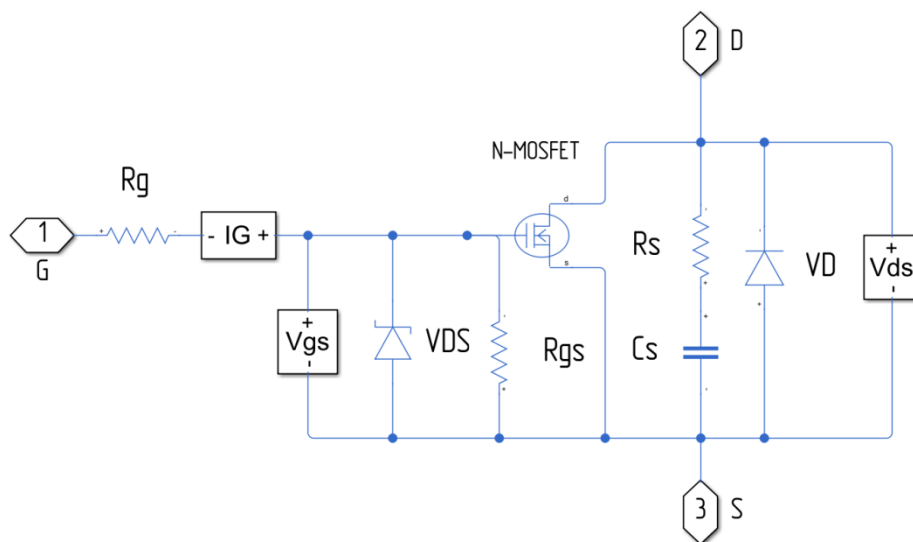


Рис. 6. Блочная Simscape-модель силового модуля системы генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

В модели используется стабилитрон (блок VDS на рис. 6) в цепи затвора MOSFET. Как было сказано выше, его основное назначение – шунтирование выбросов и поглощение импульсных помех, то есть выполнение защитных функций. Резистор в цепи затвора (блок R_g на рис. 6) ограничивает скорость коммутации и уменьшает ЕМI-помехи. Его значение в модели рассчитывалось исходя из выражения (1) и задавалось равным 10 Ом. Резистор R_{gs} выполняет защитные функции, его значение устанавливалось равным 10 кОм. Выводы блочной модели Gate, Drain и Source обозначают три основных электрода MOSFET-транзистора, которые соединяются с внешними цепями. Для измерения величины импульсов тока в цепи затвора MOSFET-транзистора в модели используется датчик тока (блок IG на рис. 6), для измерения уровня напряжения между выводами транзистора используются датчики напряжения (блоки Vgs и Vds на рис. 6). При физическом моделировании MOSFET-транзистора в системе MATLAB используется его уточненная SPICE-модель. Параметры разделены на статические (определяют вольтамперную

характеристику транзистора), динамические (определяют скорость коммутации транзистора) и параметры, которые описывают сопротивление истока и стока транзистора [17].

Силовой трансформатор. Модель силового трансформатора описывается подсистемой, состоящей из блоков, показанных на рис. 7. Гистерезисные свойства сердечника трансформатора описываются Simscape-блоком Nonlinear reluctance. В параметрах блока задаются геометрические параметры сердечника трансформатора (эффективная длина – L_e и эффективная площадь – A_e сердечника), а также начальная кривая намагничивания (зависимость $B(H)$). Для учета магнитного сопротивления системы и учета потерь на вихревые токи использовался блок Eddy Loss. Так как при работе любого трансформатора возникают потоки рассеяния, которые создаются токами первичной и вторичной обмоток, то для их учета в модели применялись два блока (блоки Primary leakage и Secondary leakage соответственно). Учет активных сопротивлений первичной и вторичной обмотки трансформатора реализуется через блоки Rpw и Rsw.

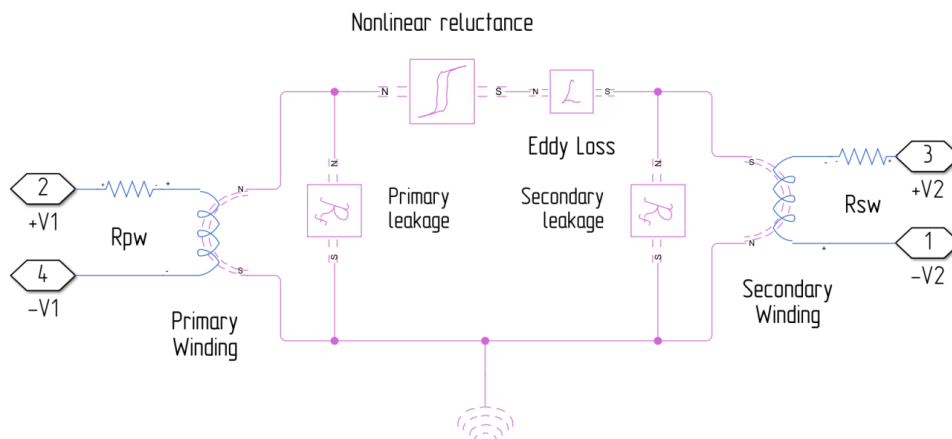


Рис.7. Блочная Simscap-модель силового трансформатора

Примечание: составлено автором.

На рис. 8 представлена комплексная Simscap-модель, которая включает в себя все вышеописанные блоки. Для лучшего восприятия в модели выделены пять основных областей. Каждая из выделенных областей включает в себя блоки подсистем (SubSystem). Области с наименованием «Драйверы верхнего плеча» и «Драйверы нижнего плеча» содержат четыре подсистемы, которые моделируют драйверы с опторазвязкой (см. рис. 4 и 5). Каждая из подсистем отвечает за генерацию управляющих импульсов с крутым фронтом, подаваемых на силовые элементы схемы. В области с названием «Мостовая схема» расположены четыре подси-

стемы с пиктограммой MOSFET-транзисторов, соединенных по мостовой схеме. Каждая из подсистем содержит блочную модель одного плеча силового модуля (см. рис. 6). Область «Блок силового трансформатора» содержит подсистему модели трансформатора (рис. 7), а также датчики тока и напряжения, которые фиксируют токи и напряжения на первичной и вторичной его стороне. В области «Результаты моделирования» отображаются временные диаграммы, на которых показаны напряжения и токи, протекающие по первичной и вторичной обмоткам силового трансформатора, а также токи и напряжения на силовых элементах схемы.

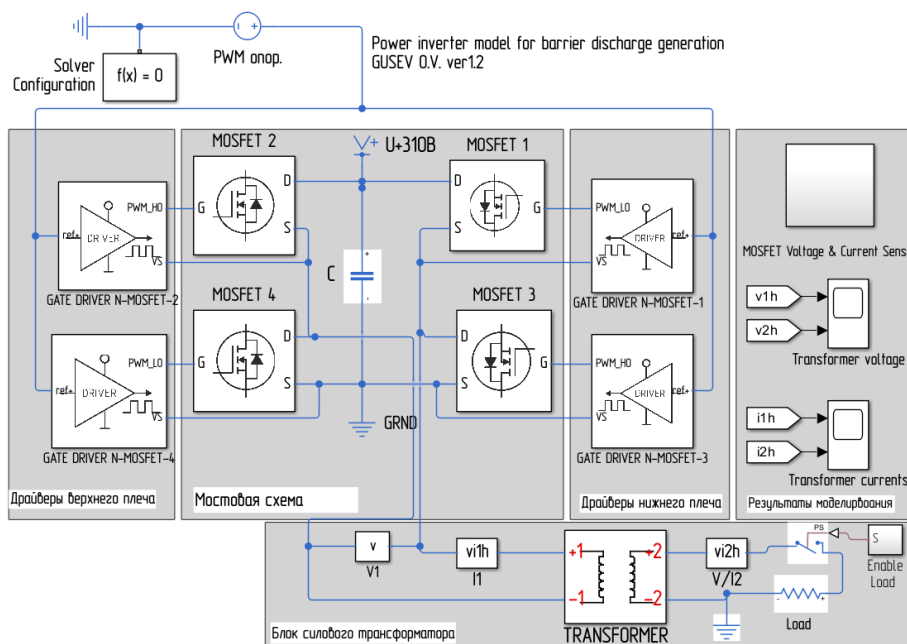


Рис. 8. Блочная Simscap-модель силового инвертора для генерации барьерного разряда

Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки результатов моделирования был изготовлен прототип силового инвертора, который имеет выраженную блочную структуру, показанную на рис. 2. Для создания запаса по коммутируемому току в качестве силовых ключей в прототипе использовались полевые MOSFET-транзисторы FQPF20N60 с максимальным током 20 А и коммутируемым напряжением до 600 В.

В качестве драйвера верхнего и нижнего плеча применялась распространенная микросхема IR2104. Для формирования управляющих импульсов (меандр) с крутым фронтом и заданной частотой следования использовалась плата Arduino NANO V3.0. Параметры MOSFET-транзисторов FQPF20N60, которые необходимы для моделирования силового инвертора в системе MATLAB, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры, описывающие SPICE-модель транзистора в системе MATLAB

Наименование	Обозначение параметра в SPICE-модели	Значение для FQPF20N60
1. Статические параметры		
Сопrotивление сток-исток в открытом состоянии, Ом	$R_{ds(on)}$	0,19
Ток стока, А	I_{ds}	11
Максимальное напряжение затвор-исток, В	V_{gs}	30
Пороговое напряжение затвора транзистора, В	V_{th}	2,5
Коэффициент модуляции длины канала	L	0,01
2. Внутренние сопротивления		
Сопrotивление стока, Ом	R_s	0,01
Сопrotивление истока, Ом	R_d	0,01
3. Динамические (емкостные) параметры		
Входная емкость, пФ	C_{iss}	2 322
Проходная емкость, пФ	C_{rss}	4
Выходная емкость, пФ	C_{oss}	105

Примечание: составлено автором по источнику [18].

В качестве высоковольтного трансформатора использовался трансформатор на основе магнитопровода марки UY20. Магнитопровод UY20 представляет собой П-образный сердечник с круглым сечением кернов из феррита марки Н44 [19]. Вторичная обмотка трансформатора содержит 3 200 витков (разбитых

на секции) провода диаметра 0,2 мм. Габаритные размеры магнитопровода даны на рис. 9а, общий вид трансформатора с высоковольтной обмоткой показан на рис. 9б. Характеристики материала представлены в табл. 2, магнитные свойства материала сердечника Н44, кривая $B(H)$, показаны на рис. 9в.

Таблица 2

Характеристики материала Н44

Наименование	Параметр	Значение	
Начальная магнитная проницаемость	μ_i	2 400 ± 25 %	
Сопrotивление, Ом*м	P	3	
Индукция насыщения, мТл	B_s	25	510
		100	390
Коэрцитивная сила, А/м	H_c	13	
Потери мощности, мВт/см ³ (25 кГц, В = 200 мТл)	P_c	25 °С	130
		60 °С	90
		80 °С	
		100 °С	100
Температура Кюри, °С	T_c	>230	
Плотность, г/см ³	d	4,8	

Примечание: составлено автором по источнику [19].

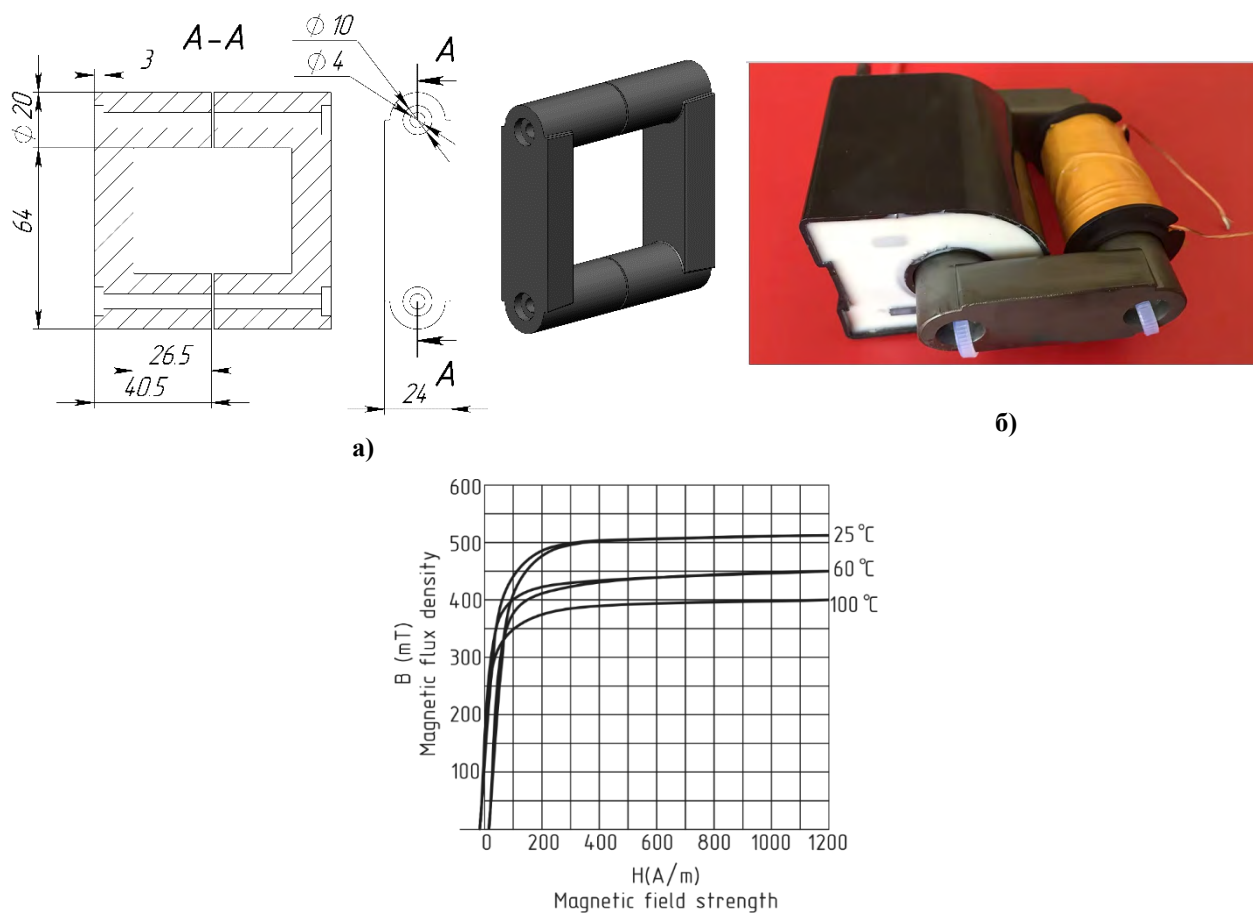


Рис. 9. Высоковольтный трансформатор:
 а) габаритные размеры магнитопровода UY20;
 б) общий вид силового трансформатор с высоковольтной обмоткой;
 в) основная кривая намагничивания $B(H)$ материала Н44 сердечника UY20

Примечание: получено автором.

Геометрические параметры магнитопровода UY20 (параметры Le и A_e), необходимые для моделирования, даны в табл. 3.

Разрядный узел выполнен в виде плоско-параллельной конструкции электродов (см. рис. 10а). В качестве диэлектрика между электродами использовалась пластина из калиевой слюды (мусковита) квадратной формы размером 25×25 мм и толщиной 0,5 мм. Электроды, изготовленные из меди, имели

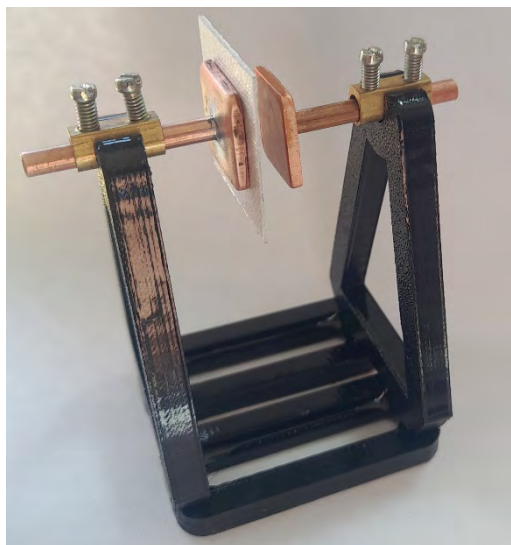
квадратную форму размером 10×10 мм и толщину 2 мм. Фото прототипа платы силового инвертора с основными узлами показано на рис. 10б. На рис. 10в показаны барьерные ряды, полученные в результате проведения эксперимента с использованием прототипа силового инвертора и разрядного узла с силовым трансформатором. Измеряемые параметры при проведении эксперимента занесены в табл. 4.

Таблица 3

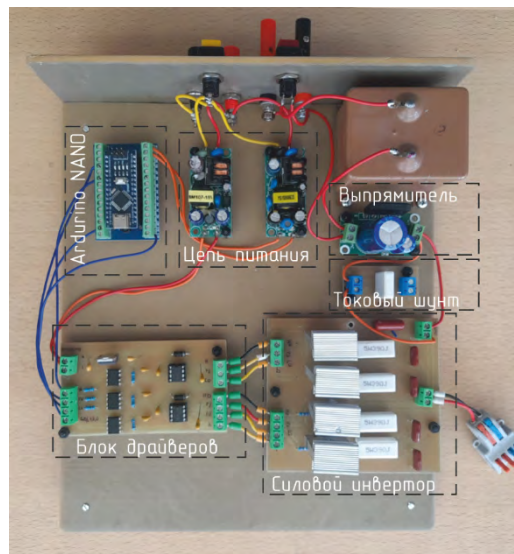
Параметры магнитопровода UY20

Наименование	Параметр	Значение
Эффективная длина магнитного пути, мм	Le	210
Эффективная площадь поперечного сечения, мм ²	A_e	290
Объем сердечника, мм ³	Ve	61 000
Постоянная сердечника, мм-1	Cl	0,724
Коэффициент индуктивности, нГн/вит ²	Al	3 750

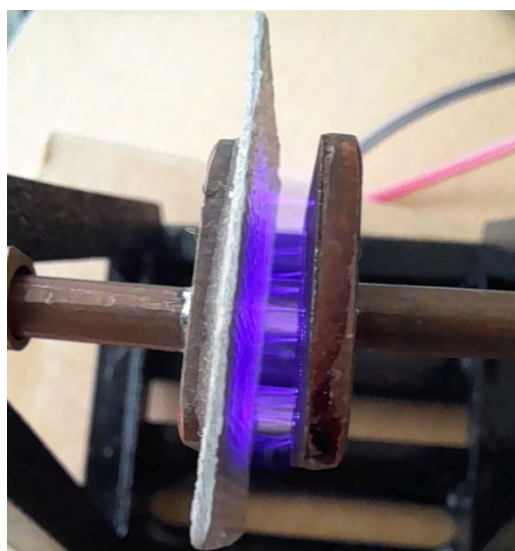
Примечание: составлено автором по источнику [19].



а)



б)



в)

Рис. 10. Макет платы силового инвертора:
 а) разрядный узел с диэлектрической вставкой из мусковита;
 б) плата силового инвертора;
 в) барьерные разряды, сгенерированные в разрядном узле

Примечание: составлено автором.

Таблица 4

Параметры эксперимента генерации барьерных разрядов

Наименование измеряемого параметра	Значение
Величина воздушного зазора между электродами, мм	6
Напряжение питания силового инвертора (напряжение пробоя), В	190
Частота следования силовых импульсов (меандр), кГц	8
Количество витков первичной обмотки, вит.	200
Величина тока до момента пробоя, мА	74
Величина тока после пробоя, мА	152

Примечание: составлено автором.

Из табл. 4 видно, что ток, при котором происходит пробой искрового промежутка, и ток, предшествующий этому состоянию, различаются практически в два раза. Увеличение тока связано с тем, что отдельные филаменты создают тонкие ионизированные каналы с высокой проводимостью (каналы плазмы), которые достаточно резко уменьшают общее

сопротивление промежутка. На рис. 11 показаны результаты измерения при проведении эксперимента и результаты моделирования платы силового инвертора. Качественное соответствие результатов моделирования и измерения позволит в дальнейшем произвести калибровку модели под конкретные экспериментальные измерения.

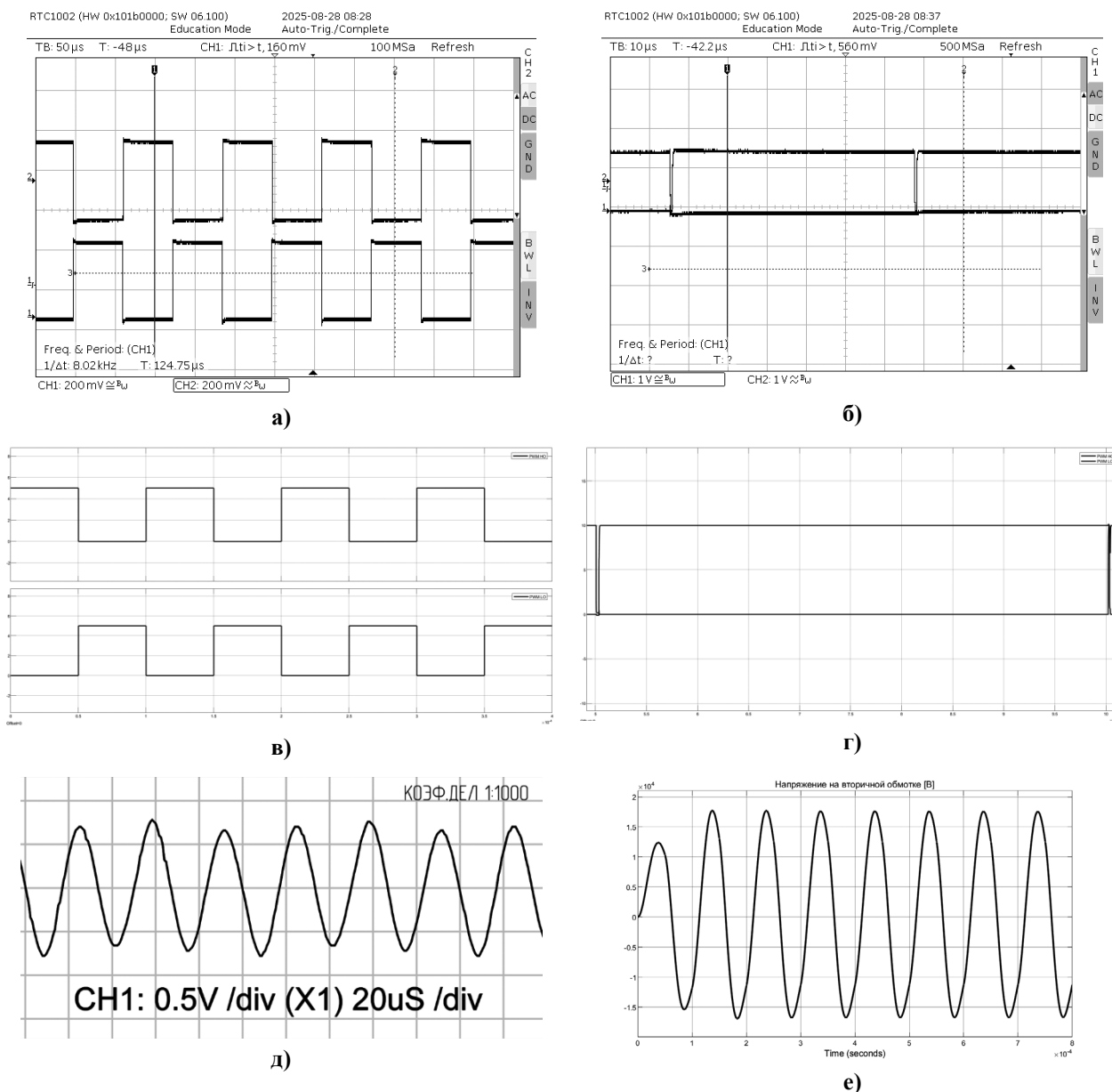


Рис. 11. Результаты измерения и моделирования:

- а) управляющие импульсы микроконтроллера (верхний и нижний каналы);
- б) импульсы с платы драйверов (верхний и нижний каналы);
- в) результаты моделирования управляющих импульсов;
- г) результаты моделирования импульсов платы драйвера;
- д) форма напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора (коэффициент деления 1:1000);
- е) результаты моделирования напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Примечание: составлено автором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена модель системы, состоящей из силового инвертора и высоко-частотного трансформатора, для устройства получения барьерных разрядов. Проверка результатов моделирования проводилась на разработанном прототипе силового инвертора с разрядным узлом и силовым трансформатором, описанными в статье. Полученные экспериментальные результаты подтвердили эффективность использования модели и могут

служить основой для дальнейших исследований. Последние могут включать варьирование частоты напряжения первичной обмотки силового трансформатора, изменение форм электродов в разрядном узле. Перспективные направления дальнейших исследований включают: изучение динамических режимов работы системы, разработку адаптивных алгоритмов управления, исследование влияния материалов электродов на стабильность разряда.

Список источников

1. Penetrante B. M., Schultheis S. E. *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Parts A and B.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1993.
2. Fridman A., Kennedy L. A. *Plasma Physics and Engineering.* Boca Raton : CRC Press, 2004. 853 p.
3. *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical, and Textile Applications* / Rauscher H., Perucca M., Buyle G., eds. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 428 p.
4. Weltmann K. D., Kindel E., Brandenburg R. et al. Atmospheric Pressure Plasma Jet for Medical Therapy: Plasma Parameters and Risk Estimation // *Contribution to Plasma Physics*, 2009. Vol. 49, no. 9. P. 631–640.
5. Рыбкин В. В., Титов В. А. Кинетика и механизмы взаимодействия окислительной плазмы с полимерами // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы.* М. : Янус-К, 2005. Т. 8. С. 130–170.
6. Wolf R., Sparavigna A. C. Role of plasma surface treatments on wetting and adhesion // *Engineering.* 2010. Vol. 2, no. 6. P. 397–402.
7. Masuhiro K., Okazaki S. Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure // *Journal of Physics D.* 1994. Vol. 27, no. 9, P. 1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/9/026>.
8. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications // *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003. Vol. 23, no. 1. P. 1–46.
9. Peeters F. J. J., The electrical dynamics of dielectric barrier discharges. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2015. 197 p.
10. Erickson R. W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics.* 2nd ed. Springer, 2001. 883 p.
11. Yang B. *Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System.* Doctoral Thesis. Virginia Tech, 2003. 317 p.
12. Liu C., Gu B., Lai J.-S. et al. High-efficiency hybrid Full-Bridge–Half-Bridge converter with shared ZVS lagging leg and dual outputs in series // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. Vol. 28, no. 2. P. 849–861. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2205019>.

References

1. Penetrante B. M., Schultheis S. E. *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Parts A and B.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1993.
2. Fridman A., Kennedy L. A. *Plasma Physics and Engineering.* Boca Raton: CRC Press; 2004. 853 p.
3. Rauscher H., Perucca M., Buyle G., eds. *Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical, and Textile Applications.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2010. 428 p.
4. Weltmann K. D., Kindel E., Brandenburg R. et al. Atmospheric pressure plasma jet for medical therapy: Plasma parameters and risk estimation. *Contribution to Plasma Physics.* 2009;49(9):631–640.
5. Rybkin V. V., Titov V. A. Kinetika i mekhanizmy vzaimodeystviya okislitelnoy plasmy s polimerami. *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plasmy.* Moscow: Yanus-K; 2005. Vol. 8. p. 130–170. (In Russ.).
6. Wolf R., Sparavigna A. C. Role of plasma surface treatments on wetting and adhesion. *Engineering.* 2010;2(6):397–402.
7. Masuhiro K., Okazaki S. Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure *Journal of Physics D.* 1994;27(9):1985–1987. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/9/026>.
8. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003;23(1):1–46.
9. Peeters F. J. J. The electrical dynamics of dielectric barrier discharges. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2015. 197 p.
10. Erickson R. W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics.* 2nd ed. Springer; 2001. 883 p.
11. Yang B. *Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System.* Doctoral Thesis. Virginia Tech; 2003. 317 p.
12. Liu C., Gu B., Lai J.-S. et al. High-efficiency hybrid Full-Bridge–Half-Bridge converter with shared ZVS lagging leg and dual outputs in series. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2013;28(2):849–861. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2205019>.

13. Power electronics handbook / Rashid M. H., ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 1522 p.
14. Baliga B. J. Advanced Power MOSFET Concepts. New York : Springer, 2010. 570 p.
15. Green P. B., Zheng L. Gate drive for power MOSFETs in switching applications. A guide to device characteristics and gate drive techniques. URL: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-gate-drive-for-power-mosfets-in-switching-applications-applicationnotes-en.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
16. Balogh L. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slua618a/slua618a.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
17. Simscape. MATLAB Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/> (дата обращения: 26.09.2025).
18. FQPF20N60-VB Datasheet. VBsemi. URL: <https://www.vbsemi.com/Package/TO220F/FQPF20N60C-VB.pdf> (дата обращения: 28.09.2025).
19. ЛЭПКОС. URL: <https://ferrite.ru> (дата обращения: 28.09.2025).
13. Rashid M. H., ed. Power electronics handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017. 1522 p.
14. Baliga B. J. Advanced Power MOSFET Concepts. New York: Springer; 2010. 570 p.
15. Green P. B., Zheng L. Gate drive for power MOSFETs in switching applications. A guide to device characteristics and gate drive techniques. URL: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-gate-drive-for-power-mosfets-in-switching-applications-applicationnotes-en.pdf> (accessed: 28.09.2025).
16. Balogh L. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slua618a/slua618a.pdf> (accessed: 28.09.2025).
17. Simscape. MATLAB Help Center. URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/> (accessed: 26.09.2025).
18. FQPF20N60-VB Datasheet. VBsemi. URL: <https://www.vbsemi.com/Package/TO220F/FQPF20N60C-VB.pdf> (accessed: 28.09.2025).
19. LEPKOS. URL: <https://ferrite.ru> (accessed: 28.09.2025). (In Russ.).

Информация об авторе

О. В. Гусев – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>,
gusevov@yandex.ru

About the author

O. V. Gusev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>,
gusevov@yandex.ru