

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И. КАНТА»
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рекомендована к защите:
методический руководитель
направления подготовки
д.ф.-м.н., профессор ИФМНиИТ

_____ В.Е. Захаров

" ____ " _____ 2020 г.

Допущена к защите:
первый заместитель директора
ИФМНиИТ
к. ф.-м. н., доцент

_____ А.А. Шпилевой

" ____ " _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема: «Разработка воздушного ионизатора на основе поверхностного барьерного разряда для медицинских приложений.»

Направление подготовки: 03.03.02 «Радиофизика»

Квалификация (степень): **бакалавр**

ВКР защищена на оценку:

Выполнил: студент 4 курса

_____ Д.Р. Боров
Руководитель: к.ф.-м.н.

_____ Д.В. Шитц

Калининград, 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава I. Барьерный разряд и его применение	5
1.1. Историческая справка.....	5
1.2. Пространственно-временная структура разряда	6
1.3. Механизм развития разряда	9
1.4. Применение барьерного разряда.....	11
Глава II. Озон. Медицинские приложения озона.....	14
2.1. Химические свойства.....	14
2.2. Синтез озона в барьерном разряде.....	18
2.3. Медицинские приложения озона	21
2.3.1. Историческая справка	21
2.3.2. Воздействие на организм	22
2.3.3. Клинические испытания	27
Глава III. Разработка экспериментальной установки	30
3.1. Плазмохимический реактор	30
3.2. Разработка схемы	32
3.2.1. Выбор топологии источника питания	36
3.2.2. Блок управления.....	41
3.2.3. Драйвер силовых ключей	49
3.2.4. Силовые ключи	52
3.2.5. Снабберная цепь.....	57
3.3. Расчет и намотка трансформатора	58
3.4. Обзор экспериментальной установки	61
Глава IV. Характеристика результатов исследования.....	63
4.1. Характеристика работы системы	63
4.2. Пути модернизации схемы	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	72

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остается актуальной тема применения озонотерапии в медицине. Несмотря на повсеместное использование современных антибактериальных препаратов, их эффективность все еще вызывает сомнения. Зачастую это связано с устойчивостью возбудителей инфекций к действующим на них антибиотикам. В свою очередь озонотерапия позволяет уничтожать бактерии, вирусы, грибки и прочие патогенные организмы, не нанося при этом вред человеку.

Однако современные промышленные приборы для генерации озона в чаще всего представляют из себя крупногабаритные и мощные системы. Это связано с необходимостью вырабатывать озон в больших количествах, поскольку чаще всего такие установки используются на станциях очистки воды. Согласно имеющейся информации, до сих пор не было представлено портативного и энергоэффективного прибора, способного производить озонкислородную смесь в необходимых количествах для непосредственного её использования в лечении пациентов.

Для разработки эффективного портативного прибора, способного генерировать озон из воздушной смеси необходимо учесть много факторов. Портативность прибора означает, что нужно добиться максимального выхода газа при минимальных размерах плазмохимического реактора. Сюда же можно отнести и уменьшение размеров источника питания, за счет упрощения схемотехники и более компактного размещения компонентов на печатной плате. Также стоит учесть энергоэффективность прибора. Увеличение рассеиваемой мощности может пагубно сказаться на эксплуатационных характеристиках.

Увеличение энергоэффективности прибора может быть достигнуто за счет правильного выбора типа разряда. На сегодняшний день одним из самых экономически эффективных процессов синтеза озона из кислородосодержащих газов является барьерный разряд. Опыты показывают, что именно

поверхностный барьерный разряд показывает максимальную эффективность в производстве озона. Вместе с тем, благодаря регулированию параметров этого разряда можно улучшить электроэнергетические и эксплуатационные характеристики систем генерации озона в целом.

Целью данной работы является создание прототипа воздушного ионизатора и исследование возможности его применения в медицинских установках.

Для достижения этой цели в данной работе решаются следующие задачи:

- выбор конструкции плазмохимического реактора, исходя из требований энергоэффективности и портативности установки;
- разработка источника питания, способного работать в широких диапазонах мощностей и частот;
- создание корпуса прибора для его безопасной эксплуатации;
- исследование полученных результатов относительно эффективности прототипа.

Глава I. Барьерный разряд и его применение

1.1. Историческая справка

В настоящее время под диэлектрическим барьерным разрядом понимается импульсный или импульсно-периодический разряд, возникающий под действием приложенного к электродам напряжения в газовой среде. При этом поверхность хотя бы одного из электродов должна быть покрыта диэлектриком, будь то стекло, кварц, керамические или полимерные материалы. Именно за счет диэлектрического барьера, который не позволяет замкнуть разрядные электроды этот разряд и получил свое название.

Исторически сложились два направления изучения барьерного разряда: первое связано с изучением разрядов, существующими в газовых полостях изоляторов, а второе с применением таких разрядов в качестве плазмохимического реактора.

Целью первого направления является разработка методов борьбы с нарушением электрической прочности изолятора.

Задачей второго же направления является изучение физико-химических процессов, протекающих при таком виде разряда, с целью увеличения эффективности синтеза продуктов, а в частности – озона.

Началом изучения барьерного разряда можно считать работы Вернера фон Сименса в конце XIX века. Связаны они были с применением разряда в системах генерации озона, в которых поток газов (кислорода или воздуха) пропускаться сквозь барьерный разряд в кольцевом зазоре между двумя стеклянными трубками (рис.1).

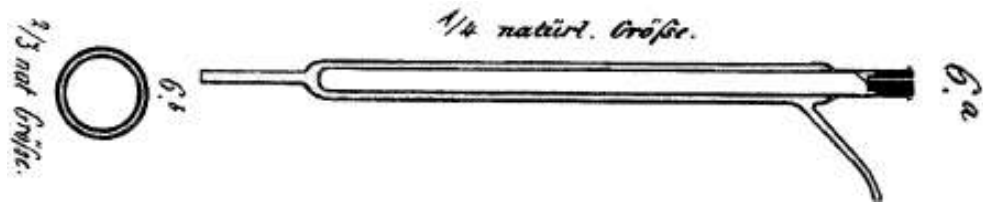


Рис. 1. Газоразрядная трубка Сименса, 1857 г.

Изначально данный тип разрядов назывался «тихий разряд». Исследование «тихого разряда» продолжалось в работах Е. Варбурга, датируемых началом XX века. В 1932 году К. Басом было сделано открытие структуры «тихого разряда» – разряд в воздушном зазоре между двумя плоскопараллельными изолированными электродами состоит из отдельных тонких плазменных каналов. Подробнее природа этих каналов была исследована японскими учеными К. Хонда и М. Сузуки, которые получили первые осциллограммы тока и напряжения таких микроразрядов, а также сумели запечатлеть их внешний вид (рис 2).



Рис. 2. Осциллографическая картина барьерного разряда. Длина разрядного промежутка 0,9 мм, напряжение 10,5 кВ.

Однако, термин «барьерный разряд», который и является общепризнанным в настоящее время, для обозначения газового разряда между изолированными электродами был предложен Е.Н. Ереминым в конце 60-х годов XX века.

1.2. Пространственно-временная структура разряда

Как уже было сказано, одним из направлений исследования барьерного разряда является его применение для синтеза озона. Совершенствование озонаторов направлено, в основном, на повышение эффективности синтеза озона и увеличение ресурса работы самого генератора. Однако сделать это невозможно без понимания пространственно-временной структуры барьерного разряда. Она же, в свою очередь, отражает механизм возникновения и развития электрического пробоя в разрядном промежутке. Важно понимать, что определяющими параметрами являются размер и форма канала микроразряда, именно они влияют на плотность вклада энергии в ионизируемый газ.

Итак, рассмотрим подробнее пространственно-временную структуру барьерного разряда. В первых своих работах Е. Варбург отметил факт появления высокочастотных составляющих тока, которые сопровождают возникновение разряда. Однако изначально исследователи не придавали значения этим «высшим гармоникам» и считали, что только основная частота является важной для протекания химических реакций [1].

Позднее интерес к структуре разряда проявили японские ученые. Во время экспериментов [2] по изучению химического действия барьерного разряда на газ, была выведена линейная зависимость между выходом продуктов в разряде и суммой импульсов тока в цепи питания озонатора. В серии работ, под авторством Багирова М.А, Курбанова М.А. и др. [3-4], было показано, что при приложении высокого напряжения происходит пробой газового промежутка в виде практически одновременно появляющихся искр – микроразрядов. Совокупность микроразрядов была названа серией. Появление новых серий зависит от значения приложенного напряжения к разрядной ячейке, величины разрядного промежутка и условий эксперимента [5].

Также было выявлено, что число микроразрядов в серии не зависит от величины приложенного напряжения. Закон распределения числа серий микроразрядов близок к гауссовому. В свою очередь, число серий зависит от

газовой среды, например, в воздухе оно в несколько раз меньше, чем в кислороде.

Положение каналов микроразряда на поверхности не является детерминированным, что говорит о стохастической природе распределения микроразрядов. Однако это характерно только для частоты импульсов менее 1 КГц. Как показывает исследование [9], при частотах порядка 75 КГц перед формированием окончательной стабильной стадии разряда происходит искровая стадия разряда. В данной стадии происходит образование ярких ветвистых каналов, которые являются областями с наибольшей плотностью тока. В таких областях формируются первые диффузные микроразряды.

При подаче следующего импульса на концах этих областей быстрые электроны, эмитируемые из-за большого падения разности потенциалов, осуществляют объемную ионизацию. Формируется переходная область, которая может играть роль плазменного катода, что обеспечивает рост области с диффузным разрядом.

Появлению быстрых электронов также, по-видимому, способствует нагрев газа в районах наибольшей плотности тока. В таких местах уменьшается концентрация рабочей смеси при нагреве, что облегчает ускорение электронов до повышенных скоростей. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при оптимальных условиях диффузные микроразряды статичны и остаются на определенном месте либо очень медленно передвигаются.

В итоге, установлено, что перенос заряда происходит в каналах микроразрядов, которые равномерно распределены по всей площади электродов. Время существования одного канала около 10-15 нс, диаметр от 0,3 до 1мм (рис.3)

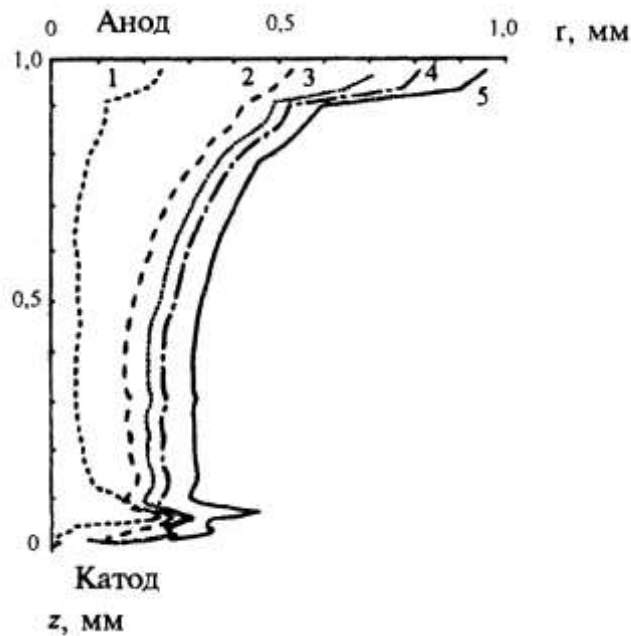


Рис. 3. Эффективный радиус канала микроразряда при $\epsilon=5$ в различные моменты времени: 1 – 10,7 нс; 2 – 13,9 нс; 3 – 15,5 нс; 4 – 17,9 нс; 5 – 32,3 нс. [7]

Формирование и распространение микроразряда происходит за время порядка 10-20 нс, далее происходит дозарядка области поверхностного микроразряда на диэлектрике около 100нс. Сам же канал имеет довольно сложную геометрию: на аноде обычно наблюдаются светящиеся пятна, когда на катоде, в свою очередь, наблюдается рисунок ветвящихся каналов, называемых фигурами Лихтенберга.

1.3. Механизм развития разряда

Барьерный разряд, как и любой другой, начинается с несамостоятельной фазы. При подаче достаточного напряжения на электроды возникает электрическое поле, которое ускоряет случайный заряд (электрон). Этот электрон, в свою очередь, ионизирует нейтральные атомы и молекулы, создавая лавину новых электронов. Добравшись до катода, положительные ионы выбивают из него электроны, которые опять становятся причиной ионизации.

В диэлектрических барьерах наблюдается эффект автоэмиссии. Электроны вылетают в газовый объем из части точек катода, в которых электрическое поле

сильно неоднородно. Образуются эти электроны из-за ионизации диполей диэлектрика, либо они находились на поверхности за счет оседания в предыдущем полупериоде, когда катод был анодом.

Согласно механизму Таунсенда, электроны, подлетая к катоду, ионизируют газ и выбивают из катода электроны, создавая тем самым лавины вторичных электронов. Лавина электронов, попадая на анод, понижает разность потенциалов на разрядном промежутке в области канала. Определенная эквипотенциальность достигается «растеканием» зарядов по поверхности, а также хаотичной природой возникновения микроразрядов. Описанный механизм относится к электронно-ионному. Хотя визуально барьерный разряд больше похож на искровой или коронный. Тем не менее барьерный разряд – это новый тип разряда и не сводится к уже известным видам.

Согласно исследованиям [7], различают 4 фазы развития канала микроразряда:

1) Фаза экспоненциального развития. В данной фазе число электронов растет по экспоненциальному закону. Лавина достигает анода примерно за 5 нс.

2) Фаза ионизационной волны. На данном этапе формируется катодный слой, за счет движения фронта положительных ионов к катоду. Время формирования такого катодного слоя составляет около 2-3 нс.

3) Фаза формирования и расширения катодного слоя. Она начинается со времени приближения ионизационной волны к катоду. За это время возрастает концентрация электронов и значение электрического поля, особенно в последние доли наносекунды. При дальнейшем формировании, катодный слой расширяется по радиусу, причем с постоянной плотностью тока. Диаметр канала вблизи катода примерно 0,4 мм, когда у анода он 0,6-0,8 мм (см. рис. 3).

4) Фаза затухания микроразряда. В этой фазе прекращается расширение канала и начинает уменьшаться концентрация заряженных частиц. Эта фраза наиболее продолжительна – около 20 нс.

1.4. Применение барьерного разряда

Как было сказано ранее, чаще всего барьерный разряд используется в озонаторах для синтеза озона из воздуха или кислорода. Но наряду с этим есть и другие применения данному типу разрядов. Например, на основе барьерного разряда работает газоразрядный источник ультрафиолетового излучения. Так в работе [8] был реализован подобный источник, а именно эксимерная лампа (рис.4).

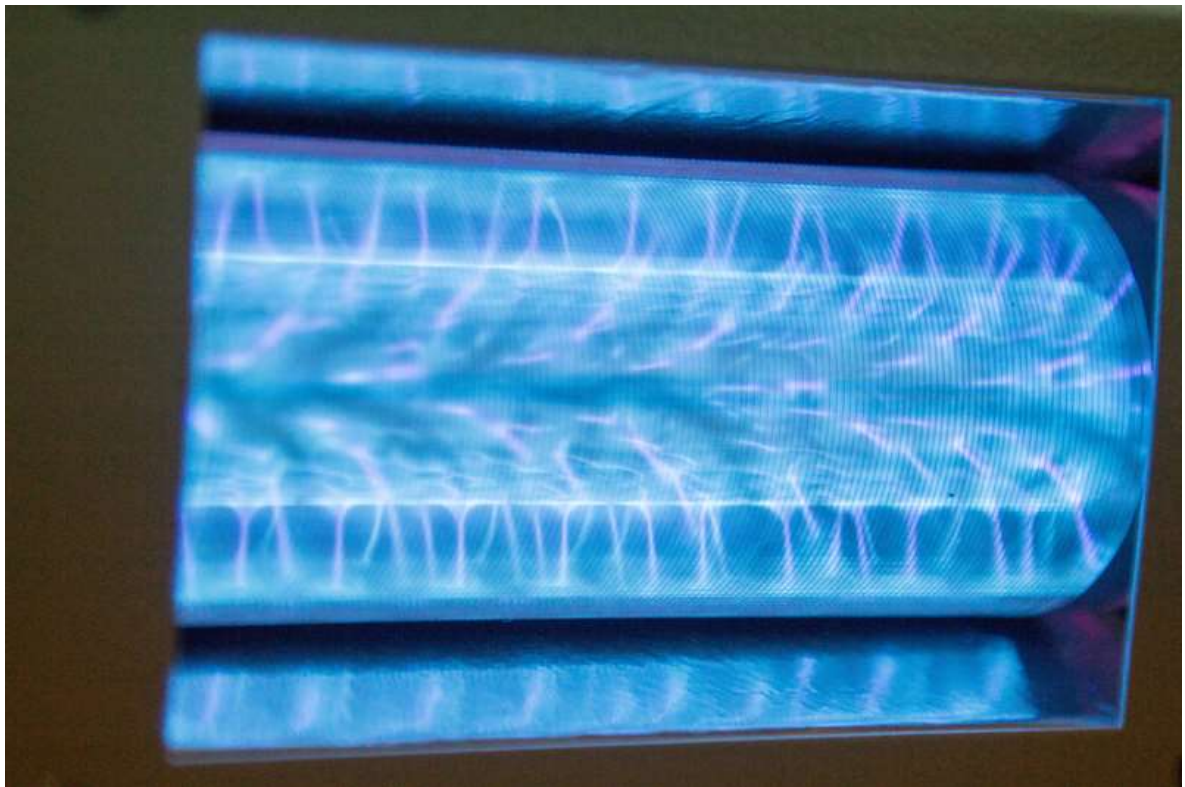


Рис. 4. Внешний вид эксимерной лампы

Целый ряд преимуществ плазмы барьерного разряда, таких как: высокое давление, пространственная неоднородность и скоротечность физико-химических процессов, сильная неравномерность плазмы, возможность вариации приведенной напряженности электрического поля, возможность задания любой пространственной геометрии излучателя и отсутствие контакта рабочей среды с поверхностью электрода, предопределил широкое использование этого разряда в эксимерных лампах.

Из-за сравнительно высокой средней энергии электронов (порядка 4-5 эВ) и низкой температуры газа барьерный разряд очень эффективен для осуществления реакций конденсации: кроме уже упомянутого процесса генерации озона в нем можно проводить множество различных органических и неорганических синтезов, при которых обычно возникают весьма необычные соединения по типу высших перекисей азота или серы. Такой разряд хорошо подходит и для реакций полимеризации. Барьерный разряд также применяется при очистке газов от лишних соединений таких, как аммиак, сероводород, летучие органические соединения.

Широкое применение данный разряд получил в обработке поверхностей металлов для улучшений адгезионных свойств и для улучшения травления или осаждения тонких пленок.

Такой разряд применялся в популярных ранее плазменных дисплейных панелях (PDP) (рис 5).

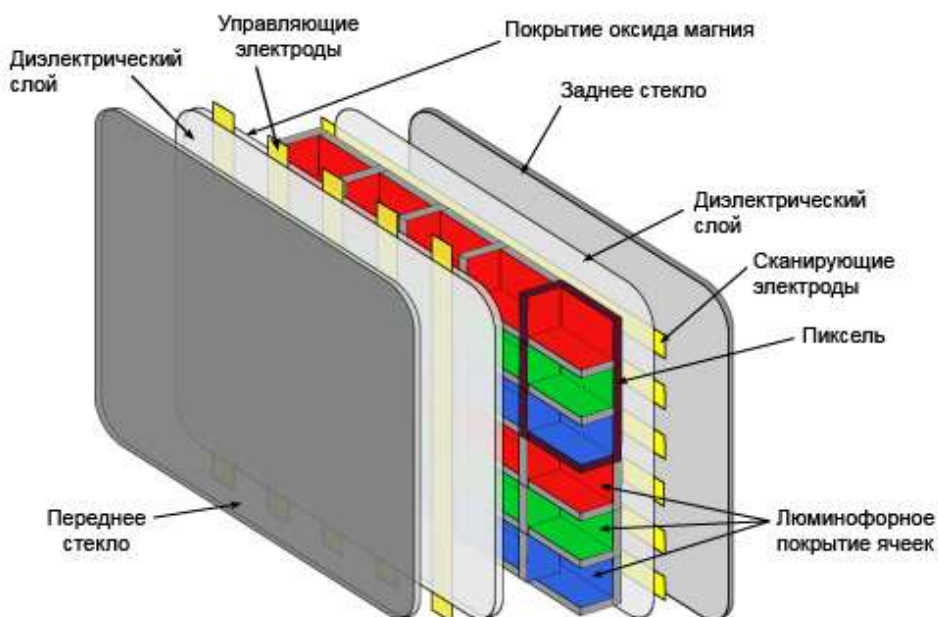


Рис. 5. Устройство плазменной дисплейной панели.

В таком типе дисплея ячейки с люминофором красного, синего и зеленого цветов периодически подсвечиваются с помощью излучения барьерного разряда.

Также перспективной является технология управления высокоскоростными потоками воздуха вокруг поверхности летательного аппарата за счет модификации пограничного слоя с помощью поверхностного барьерного разряда [10].

Существенный интерес представляет влияние барьерного разряда на полимеры [11]. В промышленности такой тип разряда используется для бомбардировки ионами поверхности полиимидных пленок. Особенность бомбардировки именно тяжелыми ионами, а не электронами, связана с возможностью передачи значительного импульса атомам или фрагментами полимерных молекул. А сопутствующее барьерному разряду ультрафиолетовое и вакуумное ультрафиолетовое излучение, наиболее высокоэнергичного, может инициировать в твердом теле фотохимические реакции образования свободных радикалов, межмолекулярных сшивок и газообразных продуктов (преимущественно водорода).

Глава II. Озон. Медицинские приложения озона

2.1. Химические свойства

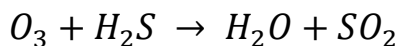
Озон – второе метастабильное состояние, после O_2 , которое образует кислород. Был обнаружен голландским физиком Мартином ван Марумом в 1785 году, во время опытов с электричеством, однако не был описан как новое вещество. Термин «озон» был введен позднее немецким химиком Х.Ф. Шёнбейном в 1840 году. Он связал изменение свойств кислорода, который выделяется при пропускании электрического разряда через него или при электролизе воды, с образованием особого газа, который в последствии и назвал озоном (от греческого «пахну»).

Данная аллотропная модификация кислорода может существовать во трех агрегатных состояниях, что является едва ли не единственным примером подобного рода [6]. Наряду с этим, озон нестабильное соединение, он разлагается при комнатной температуре на молекулярный кислород. Но, хочется отметить, что эта нестабильность не настолько велика, чтобы считать озон радикалом.

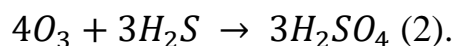
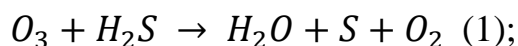
Озон – крайне сильный окислитель, с редокс-потенциалом 2,07 В, он уступает разве что фтору с 2,87 В. Другой популярный в промышленности окислитель -хлор – занимает восьмое место по окислительной способности (1,73 В), а сам кислород- тринадцатое. Исходя из своей структуры озон обладает большим запасом энергии и при диссоциации молекулы легко отдает атомарный кислород.

Существует 2 типа реакций: самого озона с веществом и реакции атома кислорода или другого фрагмента, образовавшегося в результате диссоциации озона. Можно сказать, что реакция «озон + вещество» сопровождается взаимодействием этого вещества с некоторыми другими активными формами кислорода, последняя реакция же выступает в роли отдельной стадии механизма.

Из неорганических соединений озон окисляет металлы, например ртуть, кроме золота, платины и иридия. Реагирует с аммиаком в различных состояниях, как с безводным газом, так и с водным раствором аммиака. Реакция озона с сероуглеродом:



была освещена К. Кедлом и М. Ледфордом в работе [12] по изучению процесса очищения воздуха и воды от вредных примесей. В водной среде реакция озона с сероводородом проходит по двум каналам:



В (1) наблюдается образование серы и последующее её окисление до серной кислоты. В (2) происходит прямое окисление. Последняя реакция и превалирует при избытке озона.

Немаловажную роль в промышленности играет отбелка целлюлозы озоном. При таком способе обработки исключается появление очень вредных диоксинов и хлорированных органических соединений, которые образуются при хлорной обработке целлюлозы. А также озонная отбелка целлюлозы полностью разрушает лигнинные соединения, от которых и очищается целлюлоза. Использование озона в технологии Total chlorine free позволяет сократить выбросы хлорорганических соединений в окружающую среду.

Озон применяется для очистки воды от цианидов и от ионов тяжелых металлов. В реакции с молекулой CN^- озон способствует разложению её сначала на мочевины, затем на азот и углекислый газ. При реакции с железом и марганцем в воде, соответствующие металлы окисляются и выпадают в осадок.

Реакции озона с углеводородами обширная тема, однако следует заметить, что его взаимодействие с ароматическими соединениями крайне важно и активно используются в системах дезодорации различных сред, помещений,

сточных и питьевых вод. Около 95% питьевой воды в Европе в настоящее время проходит озонную подготовку [13].

Питьевая вода подготавливается в несколько стадий. Сначала происходит коагулирование воды – с помощью специальных реагентов, таких как сернокислый алюминий, сернокислое железо, хлорное железо и железный купорос, примеси преобразуются в особые хлопья. Затем взвешенные частицы и бактерии осаждаются на этапе фильтрации. Далее же идет процесс обеззараживания воды. Озон, во-первых, дезодорирует воду и очищает от растворенных в ней органических и неорганических веществ, например, сероводорода, фенола, железа или марганца. Во-вторых, озон обладает выраженной способностью уничтожать бактерии, споры, амёбы, вирусы и различные микробы. По сравнению с обычным хлором, начиная с определенной концентрации, озон полностью уничтожает бактерии. После хлорной обработки все же остается небольшая часть уцелевших бактерий (рис. 5)

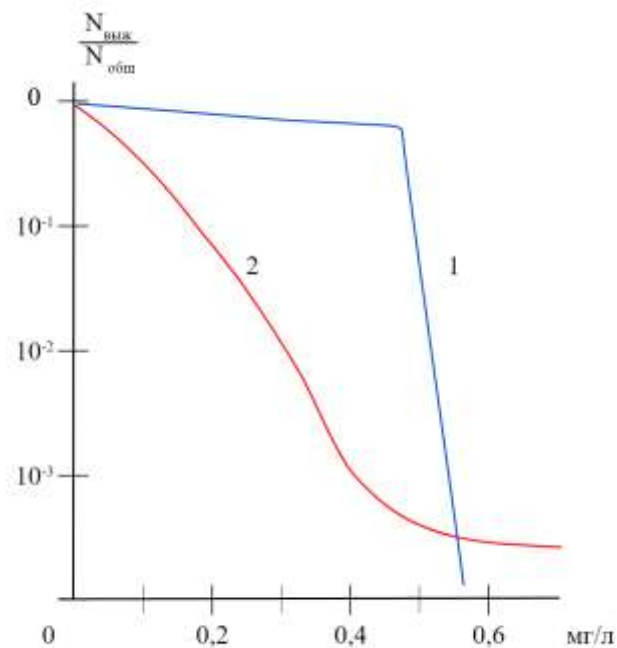


Рис. 5. График зависимости выживших бактерий от концентрации действующего вещества в озонированной (1) и хлорированной (2) воде

Озонирование воды также позволяет избежать её загрязнения. Фторирование, хоть и обладает сильной эффективностью, благодаря крайне высокому редокс-потенциалу, приводит к появлению в воде анионов фтора. Очевидно, что это нанесет вред как для окружающей среды, так и для человека, если вода предназначена для использования в пищевых целях.

Хлорирование воды наиболее популярно в наше время. Хлорсодержащим реагентам свойственно последствие – сохранение дезинфицирующих свойств в течении длительного времени после попадания в обрабатываемую среду. На сегодняшний день существуют три реагента для хлорирования воды: газообразный хлор, гипохлорит натрия и диоксид хлора. Первые два крайне опасны при транспортировке, производстве и применении. Диоксид хлора же крайне токсичное вещество, которое необходимо изготавливать непосредственно на месте применения. Важным фактором является и то, что при хлорировании воды попутно образуются галогеносодержащие соединения, которые крайне губительны для человека и обладают канцерогенным и мутагенным действием.

Более экологичной альтернативой хлорированию является озонирование воды, которое не влечет за собой вредных выбросов в окружающую среду. Озон не требует транспортировки и производится по месту действия. Причем даже с учетом возможной утечки, он, в отличие от хлора, не нанесет вреда рабочему персоналу. Помимо довольно быстрого распада, он не является летальным даже при кратковременном превышении предельно допустимой концентрации (100 мкг/м^3 , или $0,047 \text{ ppm}$ при нормальных условиях) в 10^4 и более раз [6]. При вдыхании воздуха, насыщенного озоном, в легкие попадает лишь $\frac{1}{4}$ от всего количества озона.

Озонирование воды позволяет избавиться от фенолов, особенно если при этом используются сорбенты. Дезинфекция озоном позволяет уничтожить

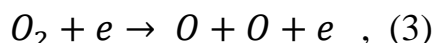
энтеровирусы, цисты лямблий, колиформы и вирусы, устойчивые к действию хлорсодержащих веществ [15].

2.2. Синтез озона в барьерном разряде

Самым энергоэффективным и экономически выгодным вариантом получения озона является его синтез из кислорода и кислородсодержащих газов [13]. Синтез озона возможен во всех типах разряда: коронном, дуговом, тлеющем, барьерном и других. Последний же и является наиболее экономически выгодным и обладает большим выходом вещества, нежели другие [6].

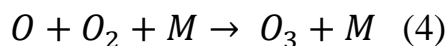
Озон получается путем диссоциации молекулярного кислорода. Диссоциация, в основном, происходит из-за столкновения молекул кислорода с ускоренными в электрическом поле электронами, а также под воздействием ультрафиолетового излучения (длиной волны менее 240 нм).

Условно реакции диссоциации кислорода обозначаются как:



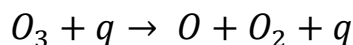
где e – частица с высокой энергией

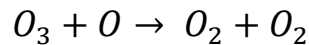
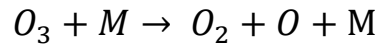
В результате столкновения молекулы водорода O_2 с атомарным кислородом и любой частицей M (атомом или молекулой) происходит реакция:



Вместе с тем, в любом источнике образования озона присутствуют реакции, способствующие разложению озона. Например, термическое разложение, реакции с радикалами и возбужденными частицами, с добавками и примесями, которые могут присутствовать в кислороде или из-за ультрафиолетового излучения самого разряда

Такие реакции можно обозначить в виде:

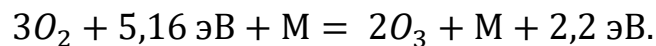




Чаще всего диссоциация в объеме реактора происходит из-за электронного удара – столкновений молекул озона с ускоренными электронами.

Анализируя (4), можно понять зависимость выхода озона от атомарного кислорода: чем больше атомарного кислорода, тем больше образуется озона. В свою очередь, исходя из (3) можно заметить, что количество атомарного кислорода строго зависит от количества электронов, с энергией подходящей для диссоциации молекулы кислорода. А на количество этих электронов влияет напряженность электрического поля в реакторе.

Распишем энергии, затрачиваемые и выделяющиеся в результате реакций (3)-(4):



Это означает, что для проведения диссоциации кислорода нужно вложить энергию равную 5,16 эВ, когда на образование озона расходуется 2,96 эВ. Отсюда получается избыточная энергия в 2,2 эВ, которая выделяется в виде тепла.

Рассчитаем КПД такого механизма электросинтеза озона:

$$\eta = \frac{A}{Q},$$

где А – работа, которую необходимо совершить для синтеза озона,

Q – полная энергия затраченная на диссоциацию кислорода

$$\eta = \frac{2,96}{5,16} = 0,57$$

В итоге получаем КПД в 57%, что, откровенно говоря, является завышенным, ведь при данных расчетах учтены только потери на образование тепловой энергии в 2,2 эВ, не учитывая другие факторы.

Считается, что минимально возможные затраты энергии составляют:

$$\frac{5,16 \text{ эВ}}{2 \text{ молекулы } O_3} = 1,44 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$$

Также имеет место суждение, что энергия, затраченная на диссоциацию кислорода, увеличится до 7,08 из-за перехода кислорода в возбужденное электронное состояние. Соответственно увеличатся и затраты энергии до 2 кВт*ч/кг. Выделяющаяся в процессе реакции тепловая энергия отрицательно влияет на концентрацию озона. Реакция разложения имеет яркую зависимость от температуры, поэтому с ростом температуры уменьшается выход озона.

В итоге можно сделать следующие выводы:

- количество образующегося озона зависит от количества атомарного кислорода в объеме реактора, на что влияет напряженность электрического поля, а, следовательно, ток барьерного разряда;
- рост тока в барьерном разряде ограничен с одной стороны электрической ёмкостью диэлектрика, а увеличением выделяющейся избыточной энергии в виде тепла, что влечет за собой рост скорости диссоциации озона.

Существует 3 необходимых условия для эффективной работы озонатора:

1) Расстояние между электродами должно быть одинаковым на протяжении всей рабочей области. Это необходимо для равномерного распределения разряда и максимального использования поверхности реактора. Также это предотвращает от возможных пробоев.

2) Недопустим нагрев озонатора. Как уже говорилось ранее, повышение температуры ведет к ускорению реакции разложения озона. Это приводит к уменьшению концентрации озона и нестабильности в работе

озонатора. При использовании стекла в качестве диэлектрика местный нагрев и неравномерное распределение разряда могут привести к нарушению электрической целостности диэлектрика и, как следствие, к пробое.

3) Очень важно осушать газ, особенно при работе с воздухом. Пары воды могут вызвать нежелательные реакции, такие как диссоциация озона.

2.3. Медицинские приложения озона

2.3.1. Историческая справка

Тернистый, но насыщенный на имена и события, исторический путь применения озона в медицине. И по сей день нет единого стандарта и рекомендаций по применению этого вида лечения от Всемирной Организации Здравоохранения. Однако многие авторитетные врачи используют данный метод уже более 160 лет.

Первые исследования влияния озона на живые организмы были проведены еще в XIX веке. Так, в 1876 году в Казанском университете В. Чемезов исследовал влияние озона на ткани животных [16]. Было обнаружено что при пропускании озоносодержащего газа через каналы подкожной клетчатки наблюдается сначала сосудосуживающий эффект, а спустя некоторое время сосудорасширяющий, вместе с деградацией периферических нервов.

В результате исследований разных стран, таких как Россия, США и Германия, в которой был создан первый институт озонотерапии в 1898 году, к концу XIX века было сделано заключение, что озон способен полностью окислять органические и не органические вещества. Это означает, что в результате таких реакций окисления продуктами будут вода, оксиды углерода и высшие оксиды других элементов. Установление избирательное действие озона в отношении биологических объектов на соединения с двойными и тройными связями. К таким веществам относят аминокислоты, белки и ненасыщенные жирные кислоты, которые входят в состав липопротеидных комплексов плазмы

и липидного слоя комплексных мембран. Биологический эффект озонирования и заключен в реакциях именно с этими соединениями.

Практическое применение озона нашлось в качестве антисептического и кровоостанавливающего средства на полях Первой мировой войны. Тогда бактерицидные свойства озона применялись в виде кислородно-озоновой смеси при лечении сложных переломов, абсцессов, гнойных ран и ожогов, в том числе вызванных применением химического оружия. Также во время Второй мировой войны немецкие и американские врачи использовали озон для местного лечения ран и ожогов. Однако после войны интерес к методике озонотерапии стал угасать как из-за появления эры антибиотиков, так и из-за отсутствия надежных и компактных генераторов озона и стойких к окислению материалов для изготовления этих генераторов.

В 1879 году была организовано Международное общество озонотерапевтов, куда вошли специалисты из США, Японии, Франции, Германии и многих других стран. В России же наиболее развитая школа озонотерапии находится в Нижнем Новгороде уже более 40 лет.

В наше время озонотерапия широко применяется в странах Европы, особенно в Германии, где налажено производство медицинских озонаторов, а лечение озоном является официальной медицинской процедурой.

2.3.2. Воздействие на организм

Озонотерапия является высокоэффективным и экономически выгодным методом лечения целого ряда заболеваний, в том числе инфекционных. Озон обладает способностью многокомпонентного воздействия на точки приложения, при местном применении, а также может оказывать полиорганное метаболическое и антисептическое воздействие при парентеральном введении в организм пациента.

Для лечения применяется медицинский озон – озонкислородная смесь, в которой процентное содержание озона от 0,05% до 10% и кислорода, соответственно от 99,95% до 90%. Получают данную смесь пропускавая сверхчистый кислород через озонатор.

Озонотерапия – дозозависимый метод лечения. В медицине применяются различные дозировки озонкислородной смеси. Так для раскрытия бактерицидных, фунгицидных и вирусоцидных свойств применяются дозы с высокой концентрацией озона, порядка 10-100 мг/л. Для заживления раневой поверхности и эпителизации используют дозы с более низкой концентрацией действующего вещества, около 0,5-5 мг/л.

По методу лечебного воздействия разделяют системное и местное применения. К первому относится внутривенное введение озонированного физиологического раствора, порции собственной крови, прошедшей воздействие озонкислородной смесью, экстракорпоральная обработка плазмы и лимфы. К местному применению относят проточную газацию поверхностей, местное орошение повреждений озонированным раствором дистиллированной воды или физиологического раствора, аппликация озонированных масел и мазей и бальнеотерапию. Помимо этого, возможно введение озонкислородной смеси внутрисуставным, подкожным и внутримышечным способами. Также возможно энтеральное применение смеси при заболеваниях желудочно-кишечного тракта (пероральный прием озонированной воды или масел, кишечные орошения и прочее).

Из-за полярного строения молекулы озон обладает высокой селективностью. В первую очередь в реакцию с ним вступают соединения, имеющие свободные двойные связи. Такие связи имеют ненасыщенные жирные кислоты, ароматические аминокислоты и пептиды с наличием сульфгидральных функциональных групп. После первичного взаимодействия с озоном с биоорганическими субстратами появляется молекула первичного озонида. Такие

озониды, в свою очередь, нестабильны и распадаются с образованием карбоксильного соединения и карбонилоксида. При взаимодействии последних образуется уже вторичный озонид, который, восстанавливаясь, распадается с образованием еще одного сильнейшего окислителя – пероксида.

Озон обладает губительным действием на все виды грамположительных и грамотрицательных бактерий, включая синегнойную палочку и легионеллу, все липо- и гидрофильные вирусы, включая вирусы гепатита А, В, С и ВИЧ, споры и вегетативные формы всех известных патогенных грибов [17]. Ко всему прочему медицинский озон может усиливать действие других лекарственных средств и, что самое главное, устранять лекарственную устойчивость микроорганизмов [18].

Усиление действия лекарственных средств озоном происходит за счет воздействия на мембраны клеток. Клеточные мембраны из-за окисления озоном белковых и липидных комплексов теряют свои барьерные свойства, чем обеспечивается более легкий проход для лекарства в клетку. В результате это может снизить дозу антибиотиков в два раза.

Терапевтические дозы озона не могут оказывать разрушающее влияние на микроорганизмы, поскольку они защищены многоярусными системами антиоксидантной защиты. Механизм действия у таких доз следующий: озонкислородная смесь, воздействуя на клеточную мембрану, снижает её гидрофобность, затем через аденилатциклазную систему активируются внутриклеточные ферментативные системы [19], сниженная активность которых и лежит в основе устойчивости микроорганизмов к лекарствам.

Эффект озона проявляется также активацией макрофагальной защиты из-за того, что озон является индуктором интерферона, фактора некроза опухоли, интерлейкинов 1 и некоторых других цитокинов [20]. За счет активизации работы фермента натрий-калиевой аденозинтрифосфатазы, которая выполняет трансфер ионов калия внутрь клетки и ионов натрия из клетки во внешнюю

среду, озон препятствует адгезии эритроцитов и их прилипанию к стенке сосуда. Озон взаимодействует с мембраной эритроцитов в местах двойных связей насыщенных жирных кислот с формированием озонидов, которые запускают работу антиоксидантной системы.

Озонотерапия может применяться при лечении пневмонии. Воздействие озона при затянувшейся пневмонии увеличивает эффективность антибактериального лечения, ускоряет рассасывание инфильтратов, определяемых рентгенологическим путем, и улучшает общее состояние больных [21].

Медицинский озон обладает явным вирулицидным действием. Наиболее чувствительные – капсулированные – вирусы содержат липиды, хорошо взаимодействующие с озоном. При воздействии озонкислородной смеси на вирусы повреждаются полипептидные оболочки, что влечет за собой нарушение способности вирусов прикрепляться к клеткам-мишеням и расщеплению нитей РНК и ДНК.

Доказано положительное влияние озонотерапии на функции печени и внутрипеченочную гемодинамику [22]. Применение озонотерапии у больных с хроническими деструктивными заболеваниями печени вызывало активацию антиоксидантной системы и снижению интенсивности свободнорадикальных реакций, что повлекло за собой снижение уровня первичных и конечных продуктов перекисного окисления липидов [23].

Известен противовоспалительный эффект озонотерапии. Это связано с окислением арахидоновой кислоты и ей производных. При воздействии озона восстанавливаются метаболические реакции на местах воспаления и окисляются двойные связи в патологических соединениях – медиаторах воспаления. Озон также не позволяет развиваться вторичным инфекциям в очагах воспаления из-за своих бактерицидных свойств.

Озон также обладает обезболивающим эффектом. Из-за окисления тканевых аллогенов озонирование помогает снизить острую боль. При хронических же болях озонкислородная смесь восстанавливает баланс между содержанием пероксидов и уровнем антиоксидантной системы защиты. Уменьшение болевого синдрома происходит из-за окисления продуктов распада белковых молекул, которые определяют интенсивность боли и воздействуют на нервные окончания поврежденного участка.

Описанные выше антибактериальные свойства озонотерапии крайне полезны. Как уже было сказано, озон не оказывает токсичное влияние на почки или печень. В свою очередь, антибактериальные препараты, несомненно, обладают выраженными побочными эффектами. Помимо развития резистентности микроорганизмов к антибактериальным препаратам, можно выделить нефротоксичность и гепатотоксичность [24]. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о целесообразности применения озонотерапии для антибактериального лечения, особенно если речь идет о местном применении.

Существует также и негативное влияние повышенных концентраций озона на организмы. Принята предельно допустимая концентрация озона в 100 мкг/м^3 . При нормальных условиях это примерно $0,05 \text{ ppm}$, что превышает обонятельный порог в 10 раз. Однако кратковременные выбросы в ходе экспериментов, превышающие ПДК в 10^4 и более раз не наносили ощутимого ущерба людям [6].

Необратимые пагубные последствия возникают при длительном воздействии озона на организм. Самое сильное влияние оказывается на верхние дыхательные пути. Длительное вдыхание высоких концентраций озона способно уничтожить как патогенные организмы, так и навредить собственной микрофлоре верхних дыхательных путей человека. Воздействие озона на человека начинается с ощущения резкого запаха, слабого раздражения горла и

носовых пазух. При более длительных воздействиях появляется кашель, сухость в горле, давление и боль в груди.

Однако стоит заметить, что до легких доходить лишь одна четверть от вдыхаемого объема озона. Это происходит из-за нестабильности озона, из-за его постоянного разложения, особенно при температуре человеческого тела, ускоряющей процесс разложения озона.

2.3.3. Клинические испытания

Ранее было показано, что озонотерапия имеет обширное применение в медицине. Рассмотрим некоторые из них. В исследовании [25] проводится анализ данных, полученных в результате кислородно-озоновой терапии витилиго. Витилиго есть ничто иное, как аутоиммунное заболевание, характеризующееся появлением на коже пигментных пятен. Патогенез данного заболевания до конца не ясен.

В настоящее время нет унифицированного метода лечения витилиго. Однако одним из основных методов лечения считается фототерапия. В качестве источника длинноволнового ультрафиолетового излучения выступают эксимерные лампы или лазеры. Но данный вид лечения все же не является самым оптимальным, в первую очередь, из-за слабого эффекта облучения. Должно пройти около 100-200 сеансов регулярного светолечения для изменения клинической картины. Также на данный момент источники ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолета являются крайне дорогими и сложными. Исключение составляют эксимерные лампы на основе барьерного разряда [8].

В наше время у практикующих врачей-дерматологов растет интерес к озонотерапии. Основной эффект лечения кожных заболеваний данным методом достигается активацией кислородзависимых реакций, вследствие которой происходит интенсификация функционирования антиоксидантной системы [26].

В результате исследования [25] было выявлено, что после проведения курса озонотерапии у 80% пациентов отмечалась стабилизация процесса развития болезни – остановился рост пятен и появление новых очагов болезни. У части пациентов наблюдалось уменьшение большей части очагов витилиго и восстановление пигментации. Налицо положительная динамика показателей терапии. Побочных эффектов выявлено не было.

Далее можно рассмотреть исследование [17], показывающее применение озонотерапии в гнойной хирургии. Здесь озонотерапия использовалась для лечения больных, находящихся в послеоперационном периоде, когда традиционные методы лечения в виде антисептиков и антибиотиков мало эффективны. Отмечено улучшение состояния больных, которые прошли 2-3 сеанса озонотерапии во время подготовке к операции. Также наблюдалось снижение температуры тела, очищение ран и уменьшение отделяемого. У некоторых больных и вовсе удалось избежать оперативного вмешательства после озонотерапии. Соответственно, после назначения курса озонотерапии для больных, отпала необходимость в приеме антибиотических препаратов. Осложнений и побочных эффектов не наблюдалось.

Особо хочется отметить местное применение озонокислородной смеси для лечения ожоговых ран [27]. В данной работе было доказано не только антимикробное действие озона на инфекционное начало, но и стимуляция новообразования сосудов и активация репаративных процессов.

Проводились лабораторные опыты, в которых больные (белые беспородные крысы) получали местное лечение озонокислородной смесью. Изначально места ожогов орошали смесью с концентрацией озона в 5 мг/л на протяжении 25 минут с целью подавления патогенной микрофлоры и борьбы с перифокальным воспалением. Спустя 5 суток концентрация и время экспозиции были уменьшены до 3 мг/л и 20 минут соответственно. В это время основной

задачей было сдерживание развития микрофлоры и стимуляция репаративных процессов.

Было выявлено, что после 10 минут действия озонированного физиологического раствора с насыщающей концентрацией 3 мг/л погибало 82-87% микроорганизмов. И все 100% погибали при концентрации 10 мг/л.

В результате лабораторных исследований отмечена высокая эффективность применения озонотерапии (*in vivo* и *in vitro*) для лечения ожоговых ран как в качестве самостоятельного метода лечения, так и в качестве предварительного озонирования стандартных антисептиков, что усиливало их бактерицидное действие до 100%.

Глава III. Разработка экспериментальной установки

3.1. Плазмохимический реактор

Существуют различные конструкции генераторов озона. На данный момент наиболее распространенными в промышленности являются трубчатые генераторы типа Велсбаха. Они представляют собой цилиндры, выполненные из металла. В центре такого цилиндра расположен электрод, выполненный из алюминия или графита. Электрод окружен диэлектриком – чаще всего стеклом. На электрод подается высокое напряжение 7-12 кВ, а сам металлический цилиндр заземляется.

Генераторы Велсбаха обычно работают на промышленной частоте 50-60 герц. Источники питания такого типа относятся к первому поколению. Они достаточно просты по схемотехнике и имеют внушительных габаритов линейный повышающий трансформатор.

Генераторы озона второго поколения имели уже повышенную частоту питающего напряжения, от 500 до нескольких тысяч герц. С увеличением частоты уменьшились и энергозатраты на генерацию озона. Также переход к импульсным источникам повлек за собой уменьшение габаритов источников питания, в частности повышающих трансформаторов, которые стали импульсными. В дальнейшем рабочие частоты только увеличивались.

Помимо генераторов Велсбаха имеются образцы генераторов от компании Fuji. По своему внешнему виду они похожи на генераторы Велсбаха, однако диэлектрический барьер теперь наносится на внутреннюю полость заземленного цилиндра. Это позволяет качественно отводить тепло от барьера, что повышает его надежность и долговечность, но в ущерб ремонтпригодности и сложности в изготовлении. Надежность диэлектрического барьера играет крайне важную роль в генераторах озона. В наше время ведется поиск все более стойких материалов, способных выдерживать непростые условия работы в окислительной среде.

Наибольший интерес представляет устройство генератора, предложенное Масудой С. и В.С. Энгельштом. В основе такого типа озонаторов лежит поверхностный барьерный разряд, отличающийся от обычного барьерного динамической ёмкостью.

Существуют разные вариации плазмохимического реактора в генераторах озона поверхностного барьерного разряда. Бывают реакторы как планарного, так и цилиндрического форм-фактора. Однако принцип действия у них одинаковый. С одной стороны от диэлектрика, которым может являться стекло, стеклоэмаль, керамика, слоистый пластик или другой стойкий к воздействиям диэлектрик, наносится плоский заземленный электрод. С другой же стороны наносится высоковольтный электрод с прорезями различной формы – это могут быть полосы, шестиугольники, круги. Материалы для электродов должны быть стойкими к окислению. Чаще всего электроды изготавливают из алюминия, титана, нержавеющей стали.

В данной работе используется плазмохимический реактор планарного типа. Диэлектрический барьер состоит из предметного стекла размером 25 на 75 миллиметров и толщиной в 1 миллиметр (рис. 6).

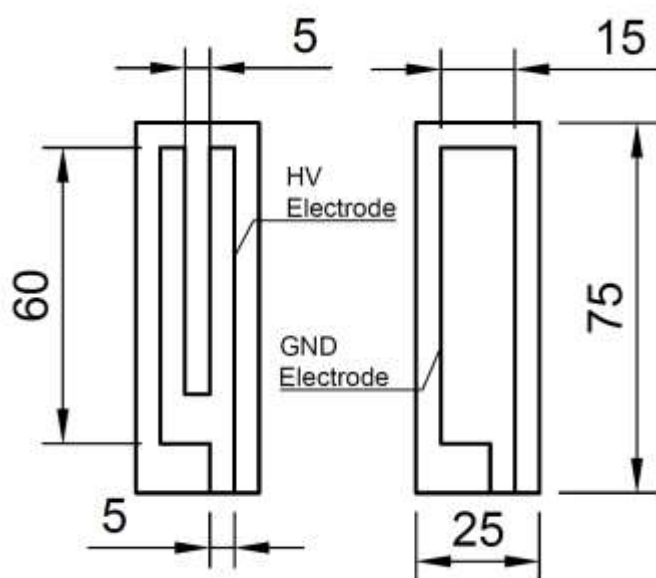


Рис. 6. Схема плазмохимического реактора

Электроды сделаны из клейкой алюминиевой ленты. Толщина ленты составляет 60 микрон.

Высоковольтный электрод выполнен в виде двух полос шириной в 5 мм, с отступами от краев и между электродами также в 5 мм (рис. 7).

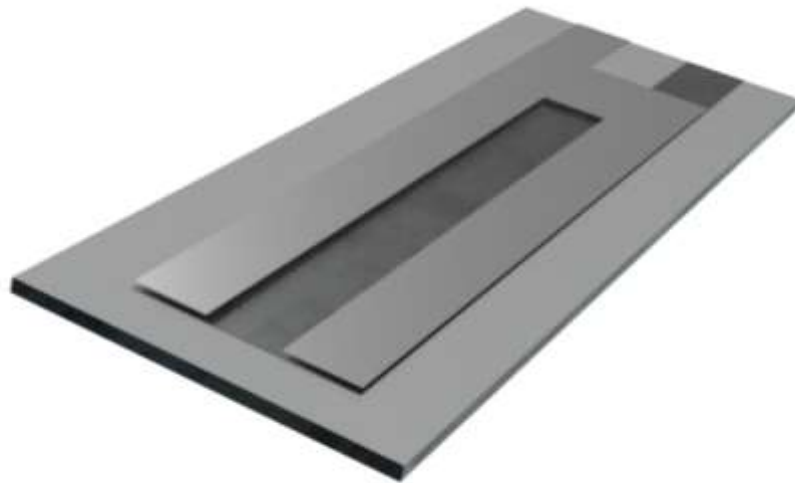


Рис. 7. Внешний вид реактора (трехмерная модель)

3.2. Разработка схемы

Для корректной работы плазмохимического реактора необходим источник питания, достаточной мощности и способный выдавать знакопеременное напряжение с заданной частотой.

Прежде всего необходимо определиться с видом источника питания. Согласно теории, это будет вторичный источник питания, так как он не будет генерировать электроэнергию, а лишь преобразовывать его. Бывают линейные и импульсные вторичные источники питания.

Линейные источники питания имеют крайне простую схемотехнику (рис. 8). «Сердцем» линейного блока питания является линейный понижающий трансформатор. В нем и кроется основной недостаток блоков питания линейного типа. Линейный трансформатор имеет внушительные габариты и низкий КПД.

Следом за трансформатором идет выпрямитель. Он может быть построен на одном диоде (однополупериодный выпрямитель) или же на диодном мосту (двухполупериодный выпрямитель). Далее устанавливается сглаживающий фильтр – чаще всего это конденсатор большой ёмкости, подключенный параллельно выпрямителю. Также может применяться фильтр на основе дросселя или комбинированное включение дросселя и конденсатора. Ко всему прочему в блоке питания может использоваться стабилизатор на выходе, для поддержания определенного напряжения, вне зависимости от скачков напряжения питающей сети. В качестве стабилизатора может использоваться параметрический стабилизатор, состоящий из стабилитрона и резистора. В эту схему стабилизации может добавляться транзистор или вовсе использоваться интегральные схемы стабилизаторов типа КРЕН или аналоги.

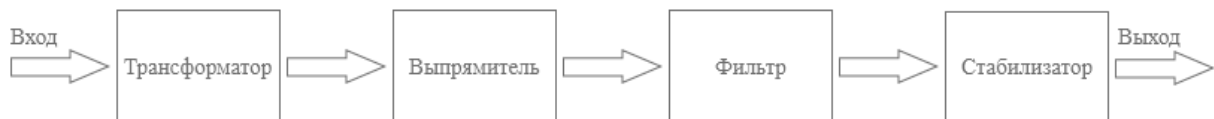


Рис. 8. Упрощенная функциональная схема линейного источника питания

В линейных источниках питания выходное напряжение имеет одинаковую полярность с входным напряжением. Причем стабилизированное выходное напряжение постоянно ниже входного. Сам же стабилизатор рассеивает мощность:

$$P_{\text{расс}} \approx I_{\text{вых}} \times (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}),$$

где $I_{\text{вых}}$ – выходной ток, $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение, $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение.

С целью улучшения показателей источника питания, увеличения КПД и повышения удельной мощности были разработаны импульсные источники питания.

В основе действия импульсного блока питания лежит инверторная схема (рис. 9). Напряжение питания из сети поступает на фильтр, задача которого свести к минимуму сетевые помехи. Также в этой части схемы могут присутствовать защиты такие, как защита от короткого замыкания на базе плавкого предохранителя. Здесь же может располагаться защита от скачков (стартовых бросков) напряжения. Для этого используют NTC (от англ. Negative Temperature Coefficient) термистор, который изначально имеет большое сопротивление и ограничивает пусковой ток. При дальнейшем воздействии тока терморезистор нагревается и его сопротивление падает до сопротивления рабочего режима, которое практически не оказывает влияние на схему, в виду своего малого значения.

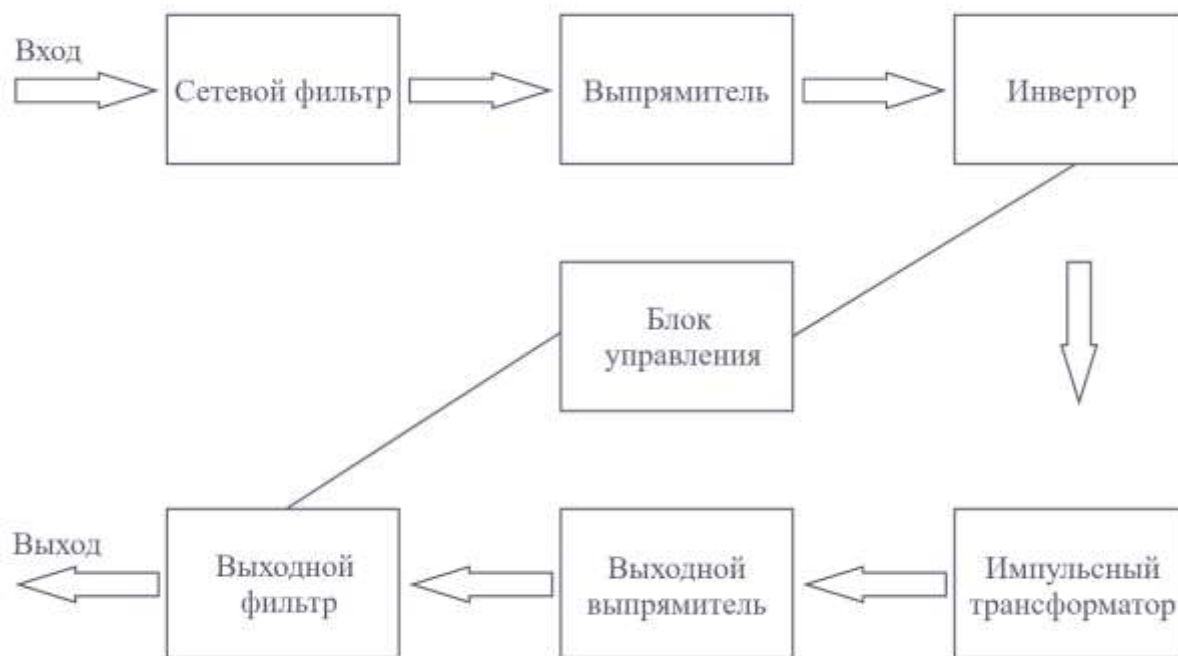


Рис. 9. Структурная схема импульсного источника питания

Далее в работу включается блок выпрямителя. Здесь обычно используются двухполупериодные выпрямители – диодные мосты – со сглаживающими фильтрами низкой частоты.

Далее ток поступает на блок инвертора. Об инверторах и их топологии речь пойдет немного позднее. Пока можно сказать, что инвертор представляет собой транзисторную схему, которая управляется контроллером блока управления. Также в блок управления входит цепь отрицательной обратной связи, которая служит для поддержания стабилизированного напряжения на выходе. Также в функции цепи обратной связи может входить защита по току, по температуре. Обратная связь должна быть гальванически развязана от сети переменного напряжения. Это реализуется за счет использования дополнительной обмотки трансформатора или оптической пары.

Следующим звеном в цепи блока питания идет импульсный трансформатор. В задачи импульсного трансформатора входит создание генераторного режима, подача напряжения на цепи защиты и питания контроллера, а также гальваническая развязка блока контроллера с высоковольтной цепью.

Импульсный трансформатор имеет ряд существенных отличий от линейного трансформатора. Для начала, его сердечник изготавливается не из трансформаторной стали, а из ферромагнитных материалов, что необходимо для надежной передачи высокочастотных импульсов.

Также для импульсного трансформатора критично включение начала и конца обмоток при его подключении. Импульсные трансформаторы обладают существенно меньшими габаритами по сравнению с линейными.

После трансформатора идет выходной выпрямитель и фильтр. Здесь ситуация аналогичная входным блокам, напряжение с вторичной обмотки трансформатора подается на двухполупериодный выпрямитель, однако вместо диодного моста обычно используются диоды Шоттки, а далее на конденсатор фильтра. Здесь же могут присутствовать датчик тока и делитель напряжения для осуществления обратной связи по току и напряжению соответственно. Далее могут располагаться различные фильтры по усмотрению производителя.

3.2.1. Выбор топологии источника питания

Первоначально, при проектировании источника питания необходимо выбрать его топологию. Термин «топология» относится к размещению компонентов на схеме. В наше время существует несколько популярных топологий блоков питания. Для каждой топологии существуют оптимальные условия, при которых источник питания сможет благополучно функционировать и обеспечивать нагрузку необходимой мощностью.

Каждая топология имеет свои преимущества и особенности эксплуатации. Например, для одной характерна низкая стоимость, но при этом выдаваемая мощность ограничена. Для другой может обеспечивать большую мощность, однако иметь дорогую элементную базу. Таким образом, главной задачей при проектировании будущего источника питания является выбор оптимальных характеристик, которые позволят наиболее экономично и целесообразно раскрыть весь потенциал источника питания.

Основными топологиями импульсных блоков питания являются однотактные обратногоходовые, двухтактные push-pull, полумостовые и мостовые схемы (рис. 10).

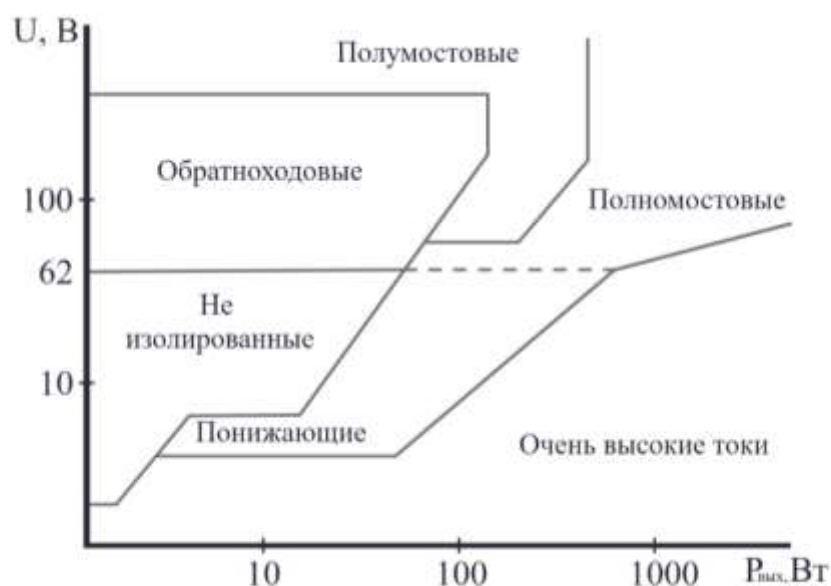


Рис. 10. Характеристики основных топологий

Как известно, импульсные источники питания являются схемами постоянной мощности. Это означает, что при необходимости снятия более высокой выходной мощности при неизменном напряжении будет повышаться пиковый ток. Значительное повышение тока может привести к выходу из строя силовых транзисторов, которые коммутируют ток в цепи инвертора.

Для маломощных блоков питания с выходной мощностью до 150 ватт оптимальным вариантом является однотактная обратноходовая схема (рис 11.)

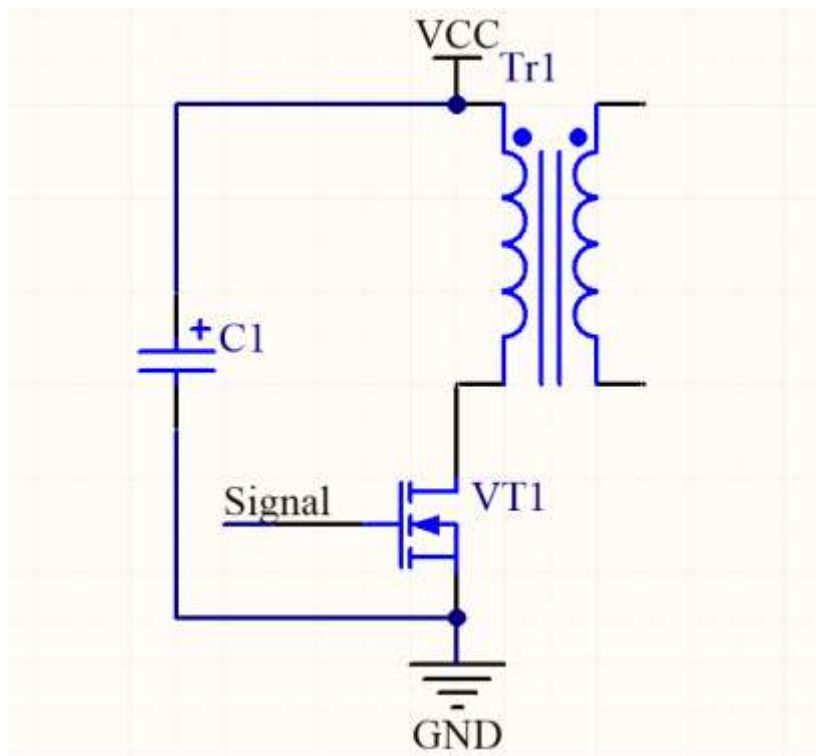


Рис. 11 Обратногоходовая схема

При работе обратноходового блока питания в начальный момент времени происходит открытие транзистора VT1, путем подачи на его затвор положительного напряжения относительно земли GND. Как известно, в момент включения сопротивление канала транзистора все еще велико и происходит значительное рассеивание мощности. Через некоторое время, когда полевой транзистор полностью открыт, происходит намагничивание первичной обмотки трансформатора Tr1. Далее, когда ШИМ контроллер посылает сигнал на выключение силового транзистора, возникает обратная ЭДС в первичной

обмотке трансформатора. В виду одноконтности схемы, импульс выброса обратной ЭДС катушки никак не используется, а гасится в специальной демпфирующей цепи – снаббере. В таких схемах в качестве снаббера обычно используется диод, электролитический конденсатор и шунтирующий резистор.

Следующая довольно популярная схема среди низковольтных преобразователей – двухтактный каскад или push-pull (тяги-толкай, пушпульная схема) (рис. 12)

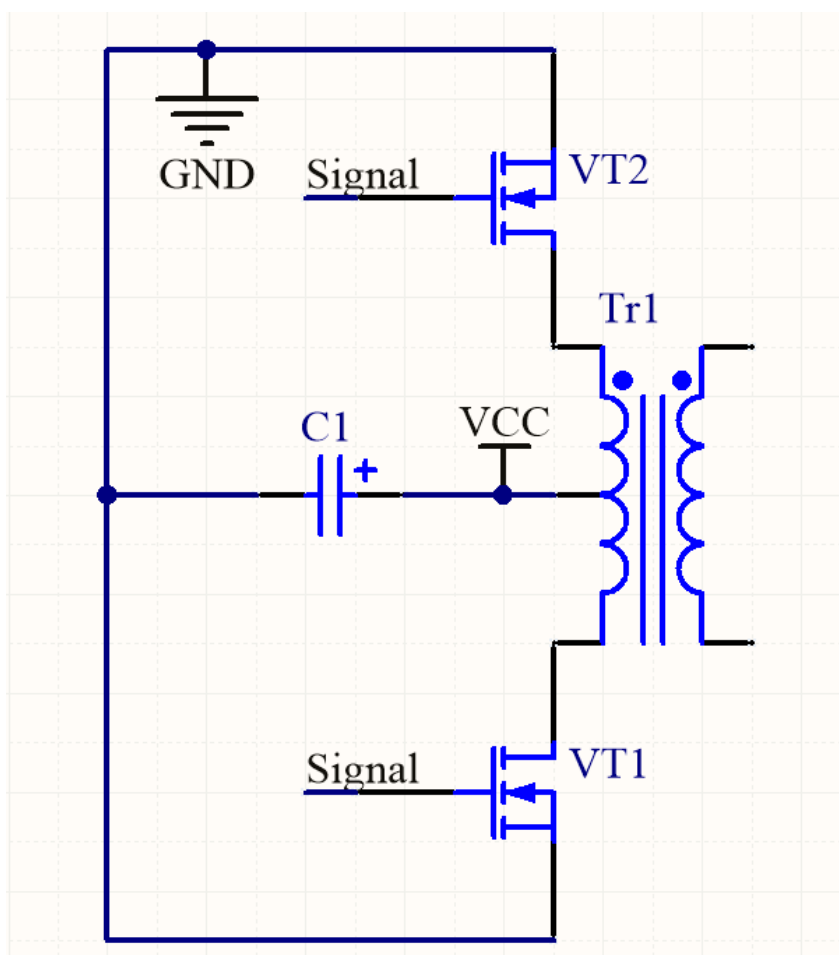


Рис.12. Схема двухтактного каскада

Схема двухтактного push-pull источника питания несколько сложнее обратноходовой схемы. Здесь используются два транзистора, которые включаются попеременно. Первая половина периода работы схемы схожа с обратноходовой: транзистор VT1 открывается и намагничивает свою часть катушки трансформатора Tr1. Во вторую половину периода работы, обратная

ЭДС, выбрасываемая катушкой после закрытия транзистора VT1, вся идет в транзистор VT2 и там же поглощается. Далее происходит намагничивание второй половины первичной обмотки трансформатора.

Данная схема демонстрирует высокую эффективность при работе от низкого напряжения, так как через каждую из двух обмоток протекает только половина необходимого тока. Однако в данной схеме существует серьезный недостаток- разбалансировка сердечника. Из-за того, что магнитный поток может иметь несимметричные, относительно нулевой точки, характеристики, происходит переход трансформатора в режим насыщения. В результате этого силовые транзисторы могут выйти из строя.

Еще одним вариантом двухтактной схемы является полумостовая схема (рис. 13).

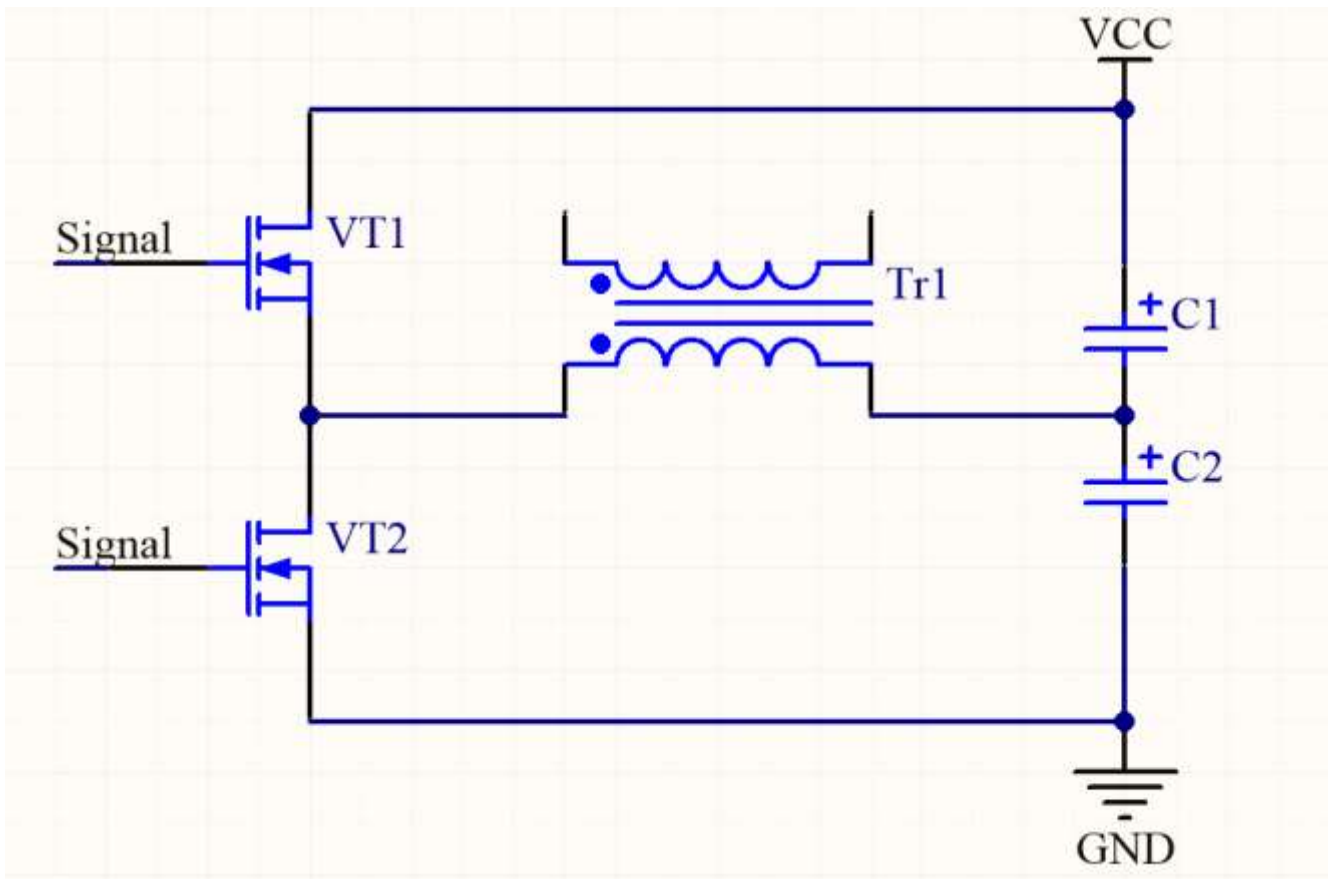


Рис. 13. Полумостовая схема

Особенностью полумостовой схемы является наличие ёмкостного делителя. Конденсаторы C1-C2 создают среднюю точку, в которую подключается один конец первичной обмотки трансформатора Tr1. В результате этого на обмотку подается напряжение, равное половине питающего.

Транзисторы VT1-VT2 попеременно соединяют обмотку трансформатора с плюсовой шины питания (VCC) и землей (GND) соответственно. Конденсатор, разряжаясь, намагничивает катушку. Здесь же возникает необходимость в некотором промежутке времени, в течении которого оба транзистора будут закрыты во избежание ничем не ограниченных сквозных токов.

Данный вид схем может применяться для высоких напряжений, имеет малые габариты и пониженный уровень помех. Однако все еще не может обеспечить такую мощность как полномостовая схема (рис. 14)

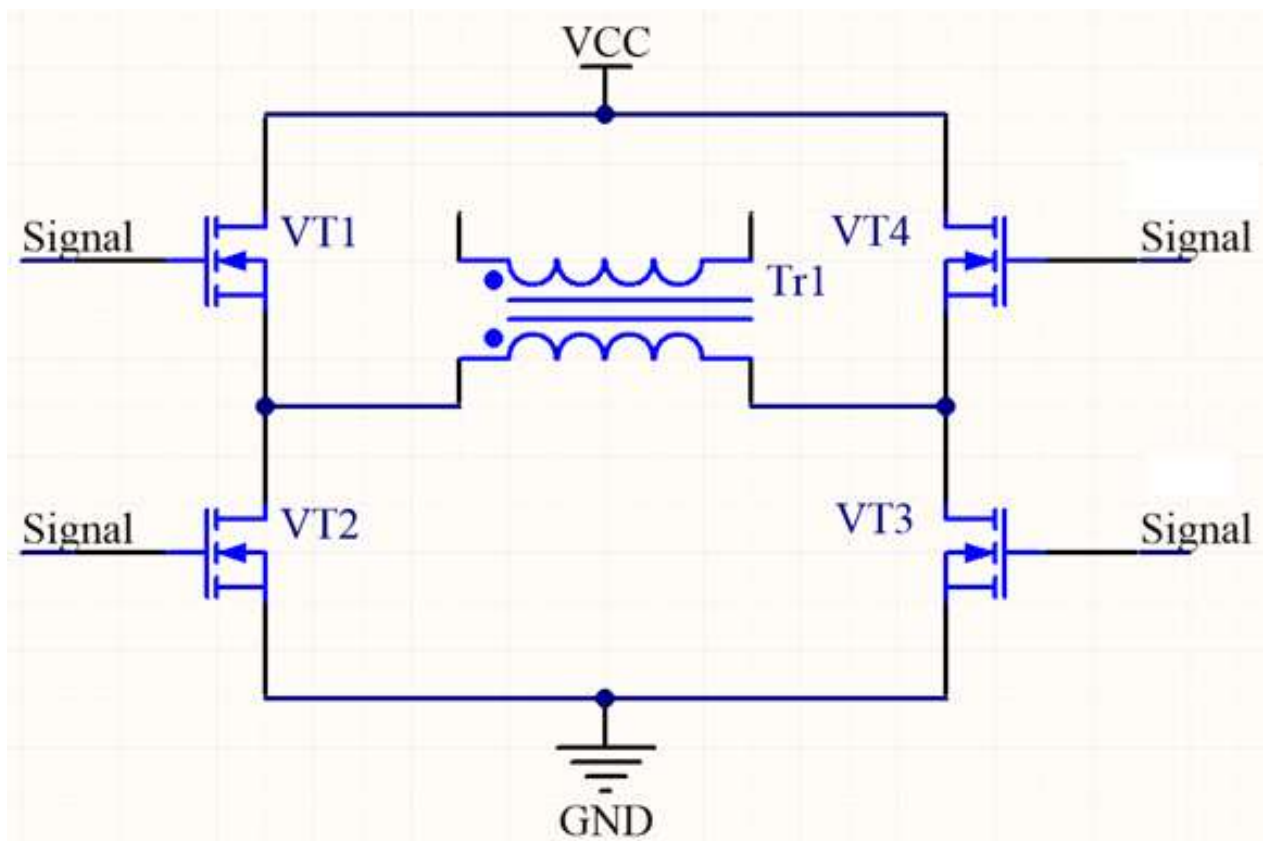


Рис. 14. Полномостовая схема

Полномостовая схема может использоваться при мощностях от 500 ватт. Её отличие от полумостовой в том, что конденсаторы ёмкостного делителя

заменены на транзисторы VT3-VT4. Транзисторы в этой схеме включаются циклически: VT1 вместе с VT3 и VT2 с VT4. Все транзисторы управляются специальными драйверами и обязательно имеют мертвое время.

Данная схема позволяет обеспечить максимальный коэффициент полезного действия, достичь высоких показателей мощности вместе с минимальным холостым током перемагничивания катушки.

В данной работе была выбрана именно мостовая схема импульсного источника питания с целью обеспечения мощности, необходимой для работы плазмохимического реактора. А также с целью минимизации паразитных процессов перемагничивания первичной обмотки, что могло негативно сказаться на работе барьерного разряда.

3.2.2. Блок управления

Для управления силовыми ключами необходимо подать на их затворы модулированный сигнал. Вернее будет сказать, что в нашей мостовой схеме модулированный сигнал сначала подается от контроллера к входу драйвера силовых ключей.

Сигнал можно получить различными типами модуляций – фазово-импульсной модуляцией, частотно-импульсной модуляцией и широтно-импульсной модуляцией. Но наибольшую популярность на данный момент имеет широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

При широтно-импульсной модуляции происходит изменение ширины импульса при неизменных частоте и амплитуде. При увеличении ширины импульса растет среднее значение напряжение, соответственно при уменьшении напряжение также падает. Отношение длительности импульса ко всему времени периода называется коэффициентом заполнения.

Рассмотрим ШИМ сигнал на частоте 10 кГц (рис. 15).

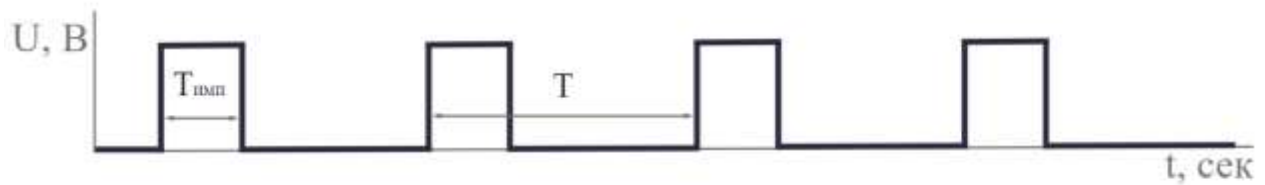


Рис. 15. Сигнал ШИМ с коэффициентом заполнения 0,3 (30%)

Период T сигнала будет обратно пропорционален частоте, следовательно равен 0,0001 сек или же 100 микросекунд. Возьмем длительность импульса $T_{\text{имп}}$ равную 30 микросекундам. Тогда найдем коэффициент заполнения k , рассчитываемый по формуле:

$$k = \frac{T_{\text{имп}}}{T} = \frac{30}{100} = 0,3$$

Существует понятие скважности импульса, которое зачастую путают с коэффициентом заполнения. Скважность же обратно пропорциональна коэффициенту заполнения и для данного случая будет примерно равна 3,33. В англоязычной литературе используется только термин *duty cycle* (от англ. рабочий цикл). Данный термин как раз и обозначает отношение длительности «рабочего» импульса ко всему периоду.

В ШИМ контроллерах модулятор состоит из двух звеньев: линейного интегратора и трехпозиционного релейного элемента. ШИМ сигнал генерируется аналоговым компаратором. На один из его входов подается вспомогательный пилообразный сигнал, а на второй модулирующее напряжение.

Частота генерации ШИМ сигнала равна частоте пилообразных импульсов. Если напряжение на генераторе $U_{\text{ген}}$ выше напряжения на компараторе, то компаратор генерирует на выходе напряжение U_{PWM} , равное логической единице, если меньше, то напряжение на выходе отсутствует. (рис. 16).

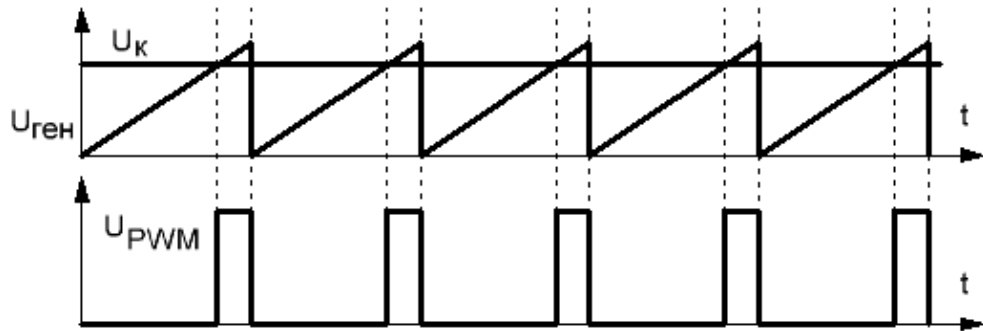


Рис. 16. Формирование ШИМ сигнала

В качестве ШИМ контроллера в данной схеме была выбрана микросхема TL494CN производства Texas Instruments (рис. 17).

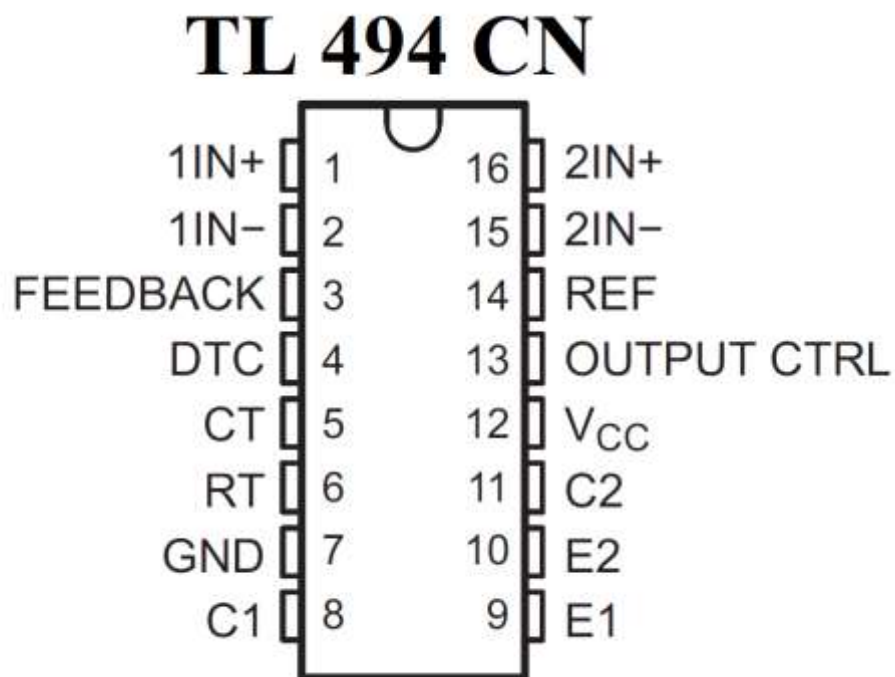


Рис. 17. Конфигурация выводов микросхемы

Данная микросхема обладает простотой в использовании и надежностью. Она пользуется значительной популярностью у производителей импульсных источников питания в виду своей невысокой стоимости и, вместе с тем, достаточным функционалом для обеспечения работы блока питания и необходимыми степенями защиты.

Данная микросхема включает в себя два усилителя ошибки, внутренний регулируемый генератор пилообразного сигнала, управляемый компаратор мертвого времени (Dead Time Control), два управляемых ключа, выходы которых (как коллектор, так и эмиттер) вынесены наружу, источник опорного напряжения в 5 вольт с погрешностью в 5% и контроль выходной цепи (feedback).

Остановимся поподробнее на принципе работы схемы. На рис. 18 представлена структурная диаграмма микросхемы TL494.

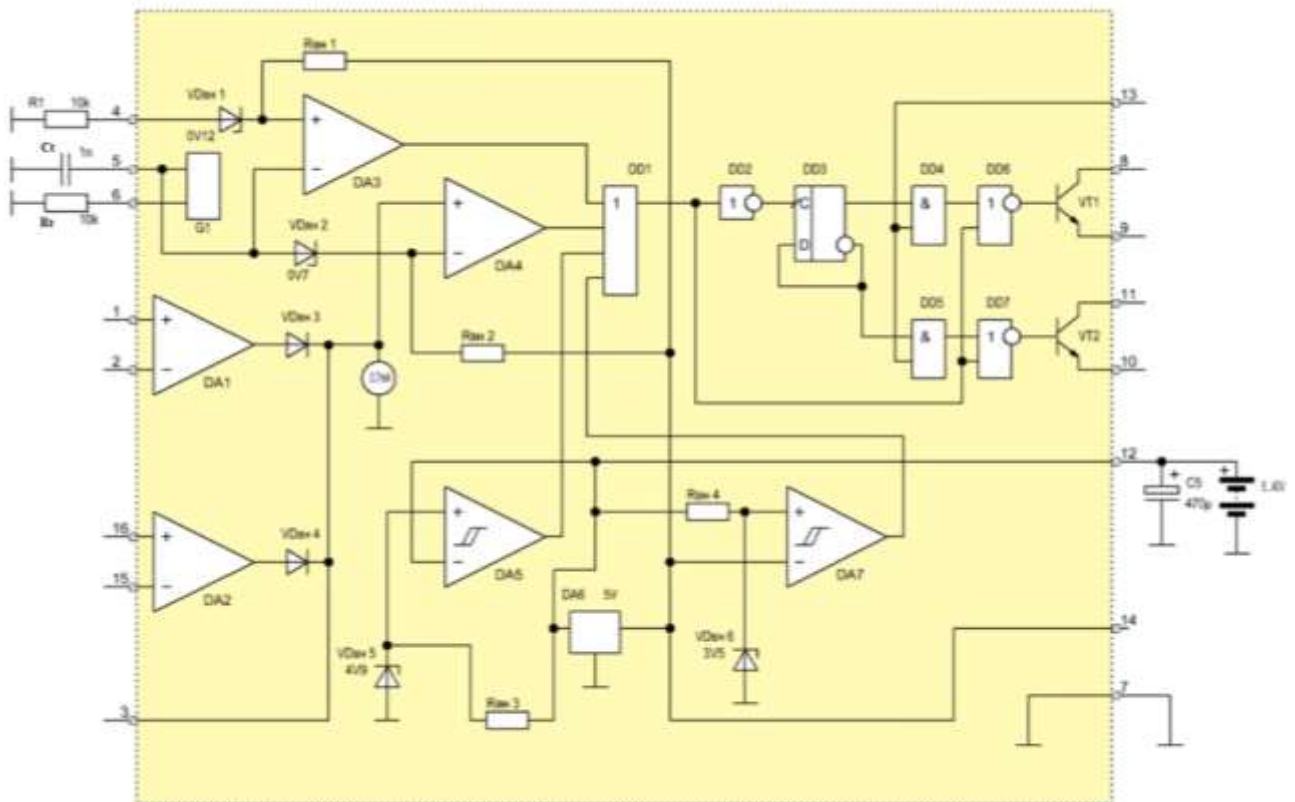


Рис. 18. Структурная схема TL494

Для начала рассмотрим диапазон входных напряжений. Схема может питаться напряжением от 5 до 40 вольт, подаваемым на 12 вывод микросхемы. При этом 7 вывод является общим (GND). На входе желательно поставить электролитический конденсатор, для стабильности питающего напряжения.

При подключении питания, происходит зарядка конденсатора фильтра питания С5. Постепенно растет напряжение на выводе 12. Напряжение на выводе стабилизатора питания DA6 будет почти равно напряжению питания всей микросхемы, до тех пор, пока это напряжение не достигнет напряжения стабилизации в 5 вольт. Пока напряжение ниже 3,5 вольт на выходе компаратора DA7 будет логическая единица. Компаратор DA7 следит за величиной внутреннего опорного напряжения микросхемы. Эта логическая единица подается на логический элемент ИЛИ (DD1). Это является первой ступенью блокировки работы микросхемы.

Второй ступенью является напряжение на выходе компаратора DA5, который следит за наличием 5 вольт в цепи линии питания. Как только напряжение питания превышает 5 вольт на инвертирующем входе DA5, компаратор выдаст логический ноль. Попадая на DD1 это снимает вторую ступень блокировки.

Внутреннее напряжение 5 вольт, выдаваемое Источником Опорного Напряжения (ИОН) используется как внутри микросхемы для стабильной работы компараторов DA3 и DA4, так за пределами микросхемы через вывод 14.

Генератор пилообразного напряжения G1 работает в зависимости от времязадающего резистора на выводе 6 и времязадающего конденсатора на выводе 5. Причем резистор на выводе 6 не принимает непосредственного участия в формировании пилообразного сигнала, а служит регулирующим элементом генератора тока. Это означает, что при уменьшении номинала резистора R_t увеличивается ток зарядки конденсатора C_t , что приводит к повышению тактовой частоты.

Пилообразный сигнал далее попадает на инвертирующий вход компаратора DA3. На неинвертирующем входе присутствует опорное напряжение 0,12 вольт. Что является 3% от амплитуды пилообразного импульса. Это означает, что независимо от частоты на выходе компаратора появится

логическая единица длительностью в 3% от длительности всего импульса. Это блокирует элемент DD1 и обеспечивает время между переключениями транзисторов (мертвое время). При увеличении напряжения на выводе 4, можно также увеличить длительность фазы покоя.

Далее пилообразный сигнал попадает на инвертирующий вход компаратора DA4, который сравнивает его с напряжением, формируемым усилителями ошибки DA1-DA2. Если величина напряжения с усилителей ошибки меньше, чем напряжение пилообразного сигнала, то он без изменения проходит далее. Иначе компаратор DA4 формирует уровень логической единицы и посылает ей на DD1, что не запрещает дальнейшую работу схемы.

После логического элемента ИЛИ DD1 стоит инвертирующий элемент DD2, который формирует фронты для D-триггера DD3. DD3 делит тактовый сигнал на 2 части, в которых поочередно разрешает работу элементов И – DD4 и DD5. Вторые входы элементов И подсоединены к 13 выводу микросхемы. Это означает, что для работы элементов И необходимо наличие логической единицы (5 вольт от источника опорного напряжения) на 13 выводе микросхемы.

После DD4 и DD5 стоит пара элементов ИЛИ-НЕ, которые выполняют операцию дизъюнкции с последующей инверсией. Это означает, что на выходе появится логическая единица только тогда, когда оба входа будут принимать логический ноль. Элементы DD6 и DD7 соединены с выходом DD1, что блокирует их работу до тех пор, пока на выводе DD1 не появится логический 0.

Далее управляющие импульсы попадают на базы транзисторов VT1 и VT2. И коллекторы, и эмиттеры данных транзисторов выведены на 8, 11 и на 9, 10 выходы микросхемы. Это позволяет использовать TL494 в двух вариантах: с общим эмиттером (Common-Emitter) и с эмиттерным повторителем (Emitter-Follower).

Выбор режима работы осуществляется 13 выводом микросхемы. Если на выводе присутствует напряжение логической единицы, то это означает, что

выбран двухтактный режим работы. Транзисторы будут открываться по очереди, а частота их открытия будет равна половине тактовой частоты. Если же соединить 13 вывод с землей, то транзисторы будут работать параллельно, частота их открытия будет соответствовать тактовой.

В данной работе используется следующая схема подключения TL494 (рис. 19).

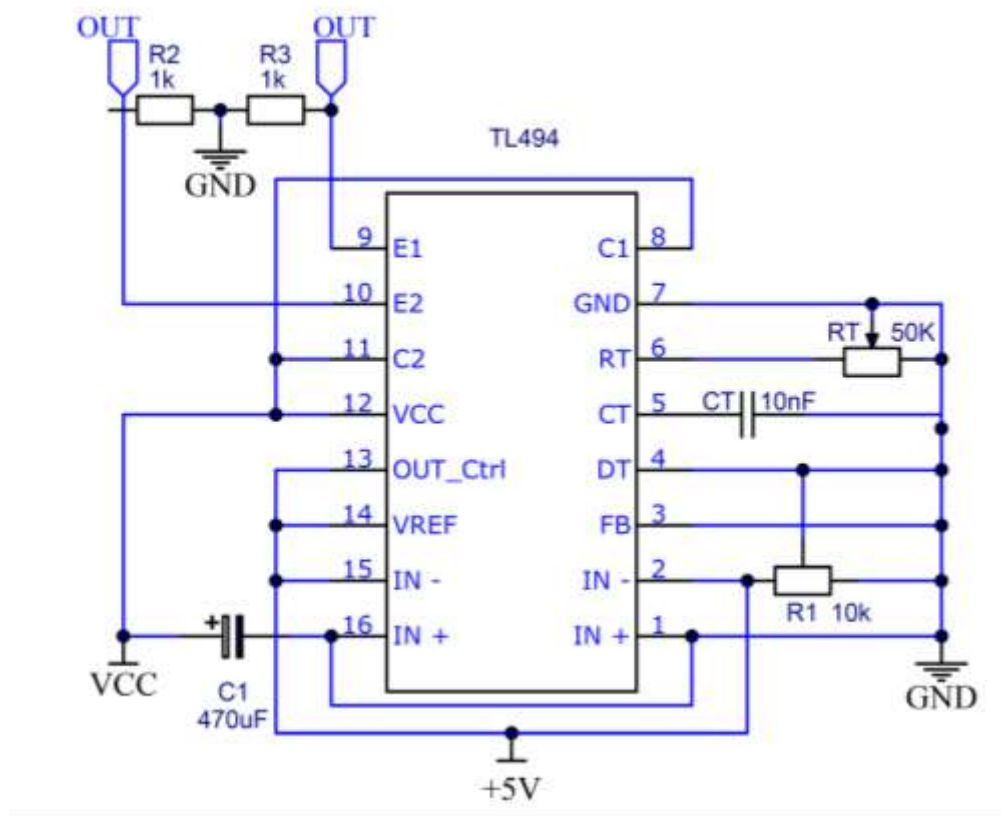


Рис. 19. Схема подключения TL 494

Для начала, на входе стоит электролитический конденсатор ёмкостью 470 микрофарад. Далее, времязадающий конденсатор CT был выбран номиналом 10 нанофарад. Исходя из этого можем определить диапазон номиналов резистора RT по графику из документации (рис. 20)

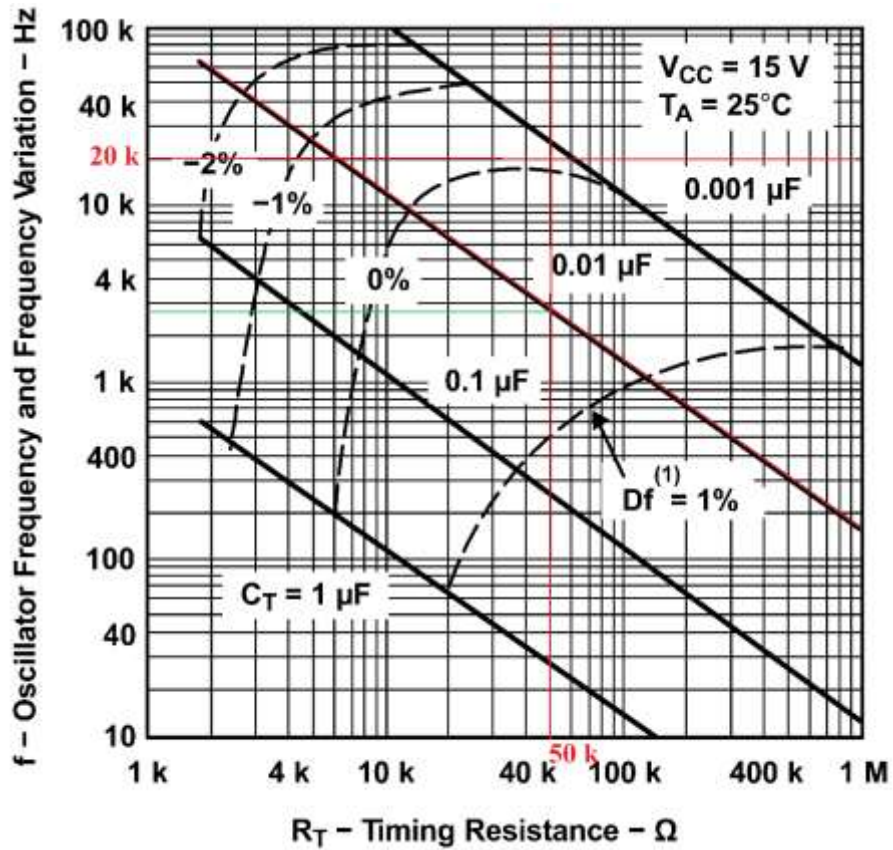


Рис. 20. График зависимости сопротивления R_T от частоты

Будем рассчитывать резистор по частоту ~ 20 КГц. По графику видно, что переменный резистор номиналом 50 КОм покрывает все частоты от 3 до 40 КГц, что позволит более обширно провести исследование на различных частотах.

Для точной настройки частоты можно пользоваться следующей формулой:

$$f = \frac{1}{2R_t \times C_t}$$

Переменным резистором R_T можно добиться подстройки частоты под нужную. Резистором R_1 можно настраивать напряжение на выходе 4 таким образом, чтобы получить необходимую длительность импульса.

В качестве выходов используются эмиттеры, подтянутые сопротивлением в 1 КОм к земле. Далее сигнал с этих выходов поступает на входы драйверов силовых ключей.

3.2.3. Драйвер силовых ключей

Как уже было сказано, для работы мостовой схемы необходимы драйверы силовых транзисторов. В наше время существует множество различных микросхем драйверов. В данной работе используется полумостовой драйвер IR2111 производства International Rectifier.

Интегральная микросхема полумостового драйвера предназначена для управления высокоскоростными MOSFET (МОП) и мощными IGBT транзисторами, работающими с напряжениями до 600 вольт. Логический выход совместим с стандартны КМОП уровнем. Встроенный блок контроля мертвого времени пресекает возможность сквозных токов. Драйвер устроен таким образом, что выдает два сигнала – верхнего и нижнего уровня, каждый из которых открывает определенный транзистор в цепи. Так как микросхема предназначена для управления полумостом, в данном источнике питания используются сразу две IR2111 для управления своим плечом мостовой схемы.

Микросхема выполнена в корпусе DIP-8 (рис. 21).

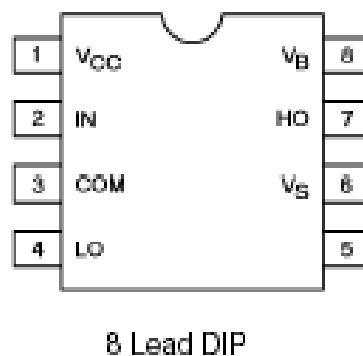


Рис. 21. Расположение выводов IR2111

Выводы имеют следующие назначения: 1 вывод VCC предназначен для питания драйвера, 2 вывод IN служит для принятия логического сигнала драйвером, 3 COM возврат питания нижнего уровня, 4 LO выход драйвера нижнего уровня, VB напряжение питания для ключа верхнего уровня, HO выход драйвера верхнего уровня, VS возврат питания нижнего уровня.

Рассмотрим функциональную схему драйвера (рис. 22).

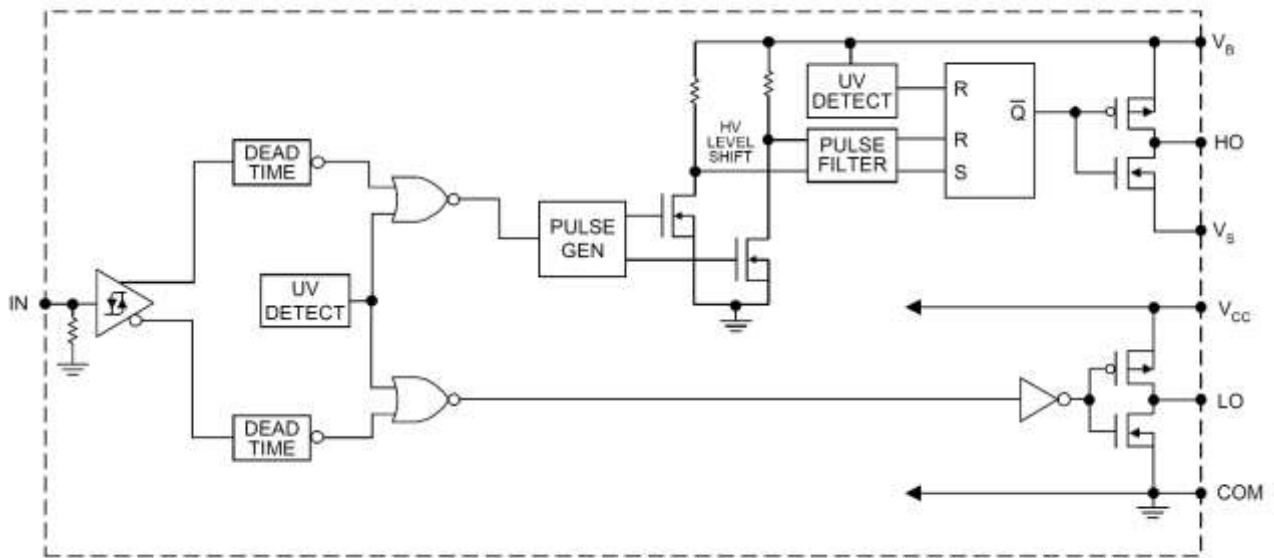


Рис. 22. Функциональная схема IR2111

При подаче управляющего сигнала на вывод IN, он поступает на триггер Шмитта. Триггер Шмитта осуществляет нормирование фронтов входного сигнала, обычно имеет гистерезис 10% от напряжения питания.

Далее идут схемы контроля мертвого времени, необходимые для исключения сквозных токов через транзисторы. Также присутствует защита от падения напряжения UV DETECT, которая предотвращает работу транзисторов в линейном режиме.

Далее следует каскад сдвига уровня. В данном каскаде содержится генератор, который вырабатывает узкие импульсы, совпадающие с фронтами входного сигнала, дискриминатор импульсов и RS-триггер.

Дискриминатор импульсов необходим для устойчивости микросхемы драйвера к воздействию переходных перенапряжения, которые возникают вследствие высоких скоростей переключения. Также он предотвращает защелкивание драйвера.

Защелкивание триггерной структуры происходит при превышении скорости нарастания напряжения (dV/dt). Для драйверов International Rectifier максимальная скорость нарастания напряжения составляет ± 50 В/нс. При более

высоких скоростях, фронт напряжения может вызвать смещение выходного напряжения драйвера, что повлечет за собой срабатывание триггерной структуры. А это, в свою очередь, может вывести из строя всю схему питания.

Важным аспектом использования драйверов является то, что для отпириания транзисторов верхнего плеча необходимо наличие на затворе напряжения выше, чем напряжение питания как минимум на 10-15 вольт. Для этого применяются буферные каскады. Так, на рис. 23 буферный каскад представлен ультрабыстрым диодом MUR160 и конденсатором C3.

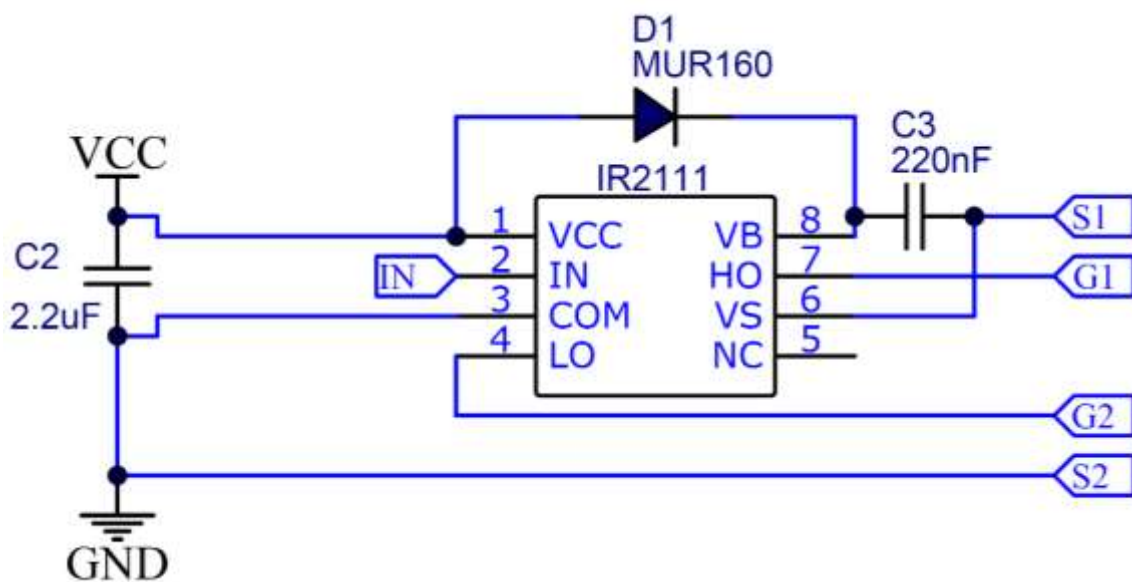


Рис. 23. Схема подключения IR2111

Работа буферного каскада заключается в следующем: при закрытом ключе верхнего уровня происходит заряд конденсатора C3, через диод D1 от источника VCC (порядка 15 вольт). Далее для открытия ключа верхнего уровня используется заряд, накопленный в конденсаторе C3. В данном случае напряжение V_b будет выше, чем на источнике входного напряжения. В виду высокой частоты и малого коэффициента заполнения в цепи достаточно конденсатора ёмкостью 220 нанофард.

Сигнал с выводов HO и LO попадает на затворы силовых ключей верхнего и нижнего уровней соответственно. Перед затворами необходимо установить токоограничительные резисторы. Возможна установка шунтирующих диодов.

3.2.4. Силовые ключи

Как уже было сказано, в данном источнике питания используется мостовая схема (рис. 24).

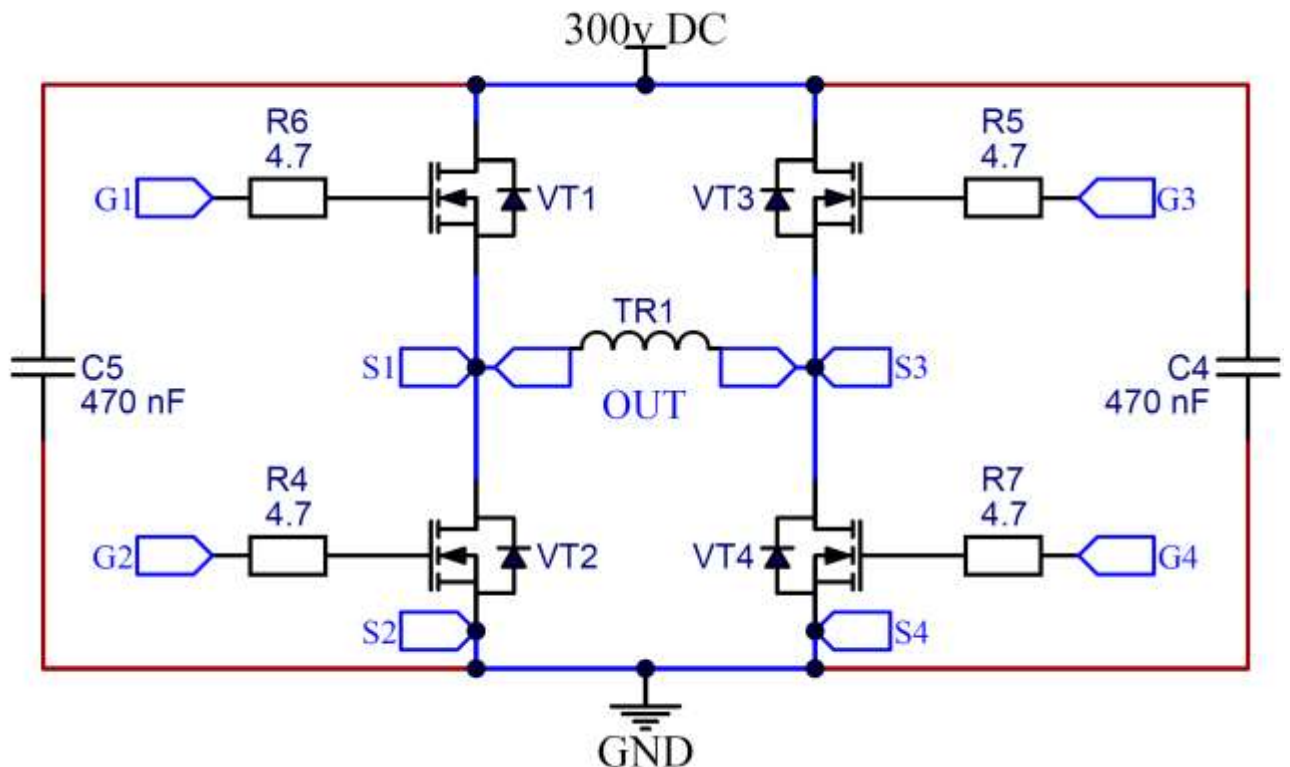


Рис. 24. Мостовая схема включения транзисторов

Управляющий сигнал с драйвера приходит на затворы транзисторов через токоограничительные резисторы. Главной задачей в выборе силовых транзисторов является расчет номинальной мощности, которую смогут пропустить через себя эти транзисторы. Также немаловажным фактором является быстродействие ключей в схемах с высокой тактовой частотой.

Обычно применяются либо MOSFET, либо IGBT транзисторы. Прежде, чем выбрать тип транзисторов, необходимо ознакомиться с особенностями работы каждого из них.

MOSFET, или же МОП: «металл-окисел-полупроводник», транзистор – это полевой транзистор в изолированным затвором. Проводящий канал в таких транзисторах может быть встроен при изготовлении или индуцирован напряжением. На рис. 25 представлено строение МОП транзистора с индуцированным затвором.

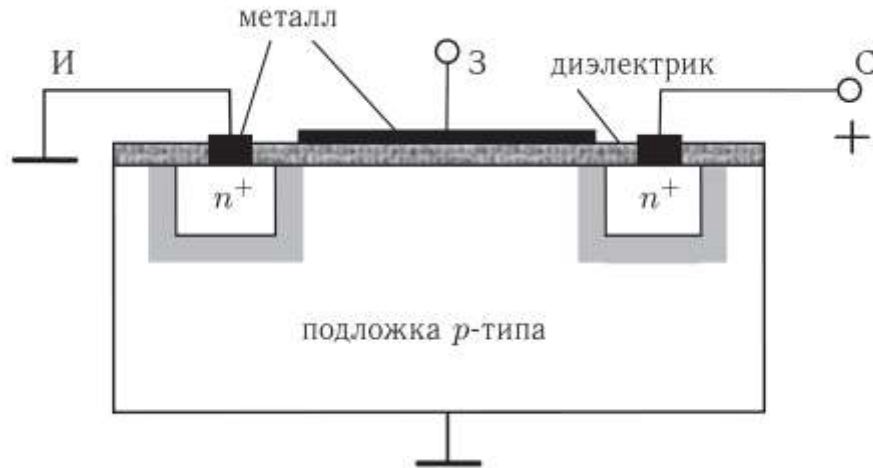


Рис. 25. Структура МОП транзистора с индуцированным каналом n-типа

Состоит MOSFET транзистор из подложки р-типа, на которую нанесен слой диэлектрика. В подложку образуют два кармана с n^+ проводимостью. Эти два кармана образуют два вывода транзистора – сток и исток. Сверху напыляется еще один металлический контакт – затвор. Исток, как правило, заземлен и соединен с подложкой.

Принцип работы таких транзисторов довольно прост. При отсутствующем напряжении на затворе сопротивление перехода сток-исток крайне велико. Ток не протекает даже при положительном напряжении на стоке. Для того, чтобы прошел ток необходимо индуцировать канал n-типа между двумя карманами. Это можно сделать благодаря электрическому полю, которое образуется при подаче на затвор положительного напряжения. Дырки начинают вытесняться из области под затвором и уступать место электронам, инжектируемым из истока. Ток электронов напрямую зависит от напряжения, приложенного к затвору.

Силовые ключи на основе МОП-транзисторов обладают значительным быстродействием. Однако в виду конструктивных особенностей, полевые транзисторы имеют один существенный недостаток. Даже в открытом состоянии переход между стоком и истоком представляет собой активное сопротивление, величиной в несколько Ом. Что может повлечь за собой значительные потери в мощности при росте напряжения.

Если необходимо понизить потери на ключе, то нужно выбрать МОП-транзистор с низким сопротивлением канала сток-исток. Однако не стоит забывать, что при нагреве сопротивление вырастет, а вместе с тем вырастут и потери.

Большинства недостатков полевого транзистора лишен полупроводниковый прибор под названием IGBT (от англ. Insulated Gate Bipolar Transistor) транзистор, или биполярный транзистор с изолированным затвором. Такой транзистор является неким гибридом между полевым и биполярным транзисторами. Входная часть его устроена как у полевого, это означает, что управляется такой прибор приложенным потенциалом к затвору, с минимальными затратами на управление. А выходная часть устроена по принципу биполярного транзистора, что влечет за собой большее допустимое напряжение между коллектором и эмиттером (рис. 26)

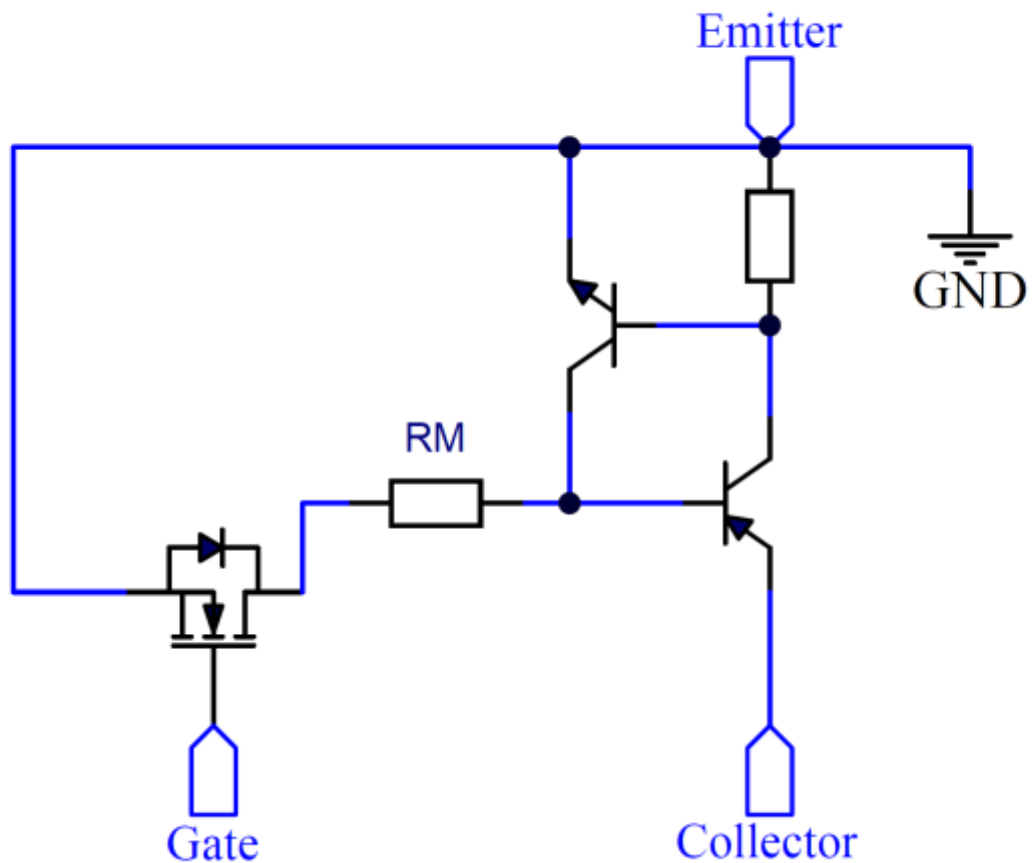


Рис. 26. Эквивалентная схема IGBT транзистора

Рассмотрим внутреннюю структуру IGBT транзистора. Как показано на рис. 27, верхняя часть очень похожа на строение полевого транзистора – два кармана n-области и затвор, образованный металлической пластиной. Для повышения рабочего напряжения прибора введена слабо легированная область n^- . В области стока МОП-транзистора введен слой p^+ . В результате образуется большой площади биполярный p-n-p транзистор. Коллектору IGBT транзистора соответствует p^+ область биполярного транзистора – эмиттер. А эмиттеру IGBT соответствует контакт, обращенный к истоку МОП-транзистора или же p^- область биполярного транзистора (коллектор).

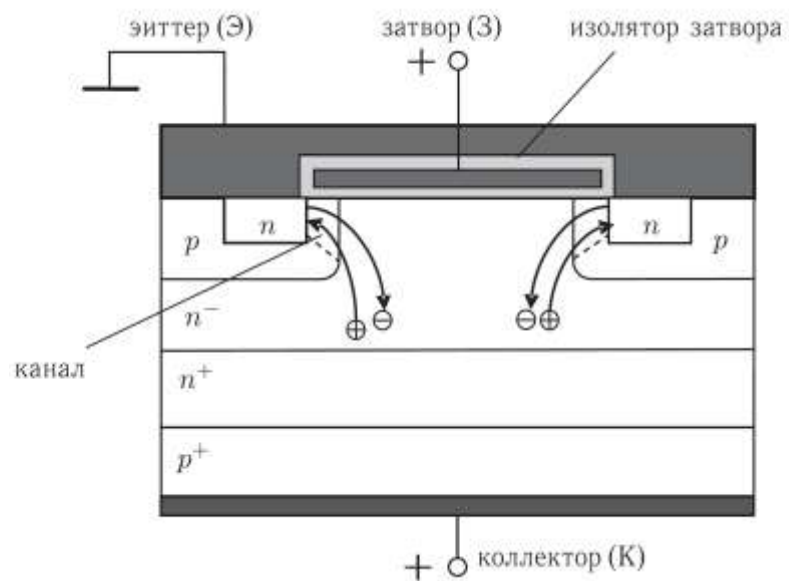


Рис. 27. Внутренняя структура IGBT транзистора

В данном приборе полевой транзистор управляет работой биполярного. При подаче положительного потенциала на затвор формируется канал n-типа между стоком и истоком полевого транзистора. Открытие полевого транзистора влечет за собой движение электронов в область базы биполярного p-n-p транзистора, из n-области в область p, а далее в n^-n^+ , которая представляет собой область стока полевого транзистора. Появление базового тока в области n^-n^+ служит причиной открытия биполярного транзистора и появлению тока из области p^+ (эмиттер) в область p (коллектор). Происходит падение сопротивления n-области (R_M на рис. 26) из-за встречных потоков электронов и дырок. Ток МОП транзистора усиливается биполярным транзистором.

IGBT транзистор обладает негативным эффектом «защелкивания». Это происходит из-за паразитного биполярного n-p-n транзистора, который вместе с выходным p-n-p транзистором образуют паразитный тиристор. А, как известно, тиристор характерен тем, что будет оставаться в открытом состоянии до тех пор, пока его коллекторный переход не будет смещен в прямом направлении. Хотя как описывалось ранее, современные IGBT транзисторы могут защелкиваться лишь при превышении предельно допустимой частоты.

Приведем сравнения MOSFET и IGBT транзисторов по некоторым пунктам. При повышении температуры у МОП транзистора растет внутреннее сопротивление, следовательно и потери на нагрев. У IGBT транзисторов наоборот, при росте температуры снижается напряжение насыщения p-n перехода, следовательно уменьшаются потери на нагрев. IGBT имеют ограниченные динамические характеристики. Частота их переключения зачастую гораздо ниже частоты переключения МОП-транзисторов. Задержки переключения IGBT транзисторов связаны с наличием паразитных емкостей (затвор-эмиттер, затвор-коллектор, коллектор-эмиттер) (рис. 28).

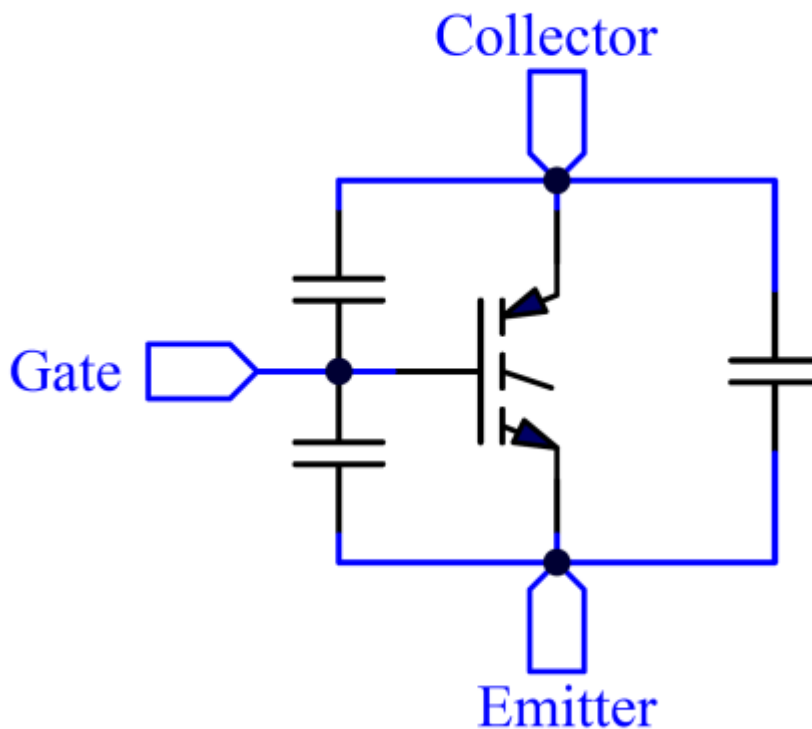


Рис. 28. Паразитные ёмкости в IGBT транзисторе

По итоге можно сделать вывод, что при высоких напряжениях и относительно низких частотах до 10 КГц оптимальным вариантом является IGBT транзистор. При относительно небольших напряжениях порядка 300 вольт, но высоких частотах предпочтение стоит отдать MOSFET транзисторам.

В данной работе, в виду экспериментального характера установки, а именно необходимости проверить зависимость генерации озона от различных частот. При условии максимального напряжения в цепи питания 300 вольт постоянного тока. Были выбраны IGBT транзисторы IRGB20B60PD1PBF с рабочим напряжением до 600 вольт и максимальным током коллектор-эмиттер 40 ампер при комнатной температуре.

3.2.5. Снабберная цепь

Для правильной работы мостовой схемы необходима снабберная цепь. Снаббер – это демпфирующее устройство, берущее на себя роль фильтра низких частот и замыкающее на себе ток переходных процессов.

Снаббер предназначен для подавления индуктивных выбросов катушки трансформатора и для понижения значений перенапряжения переходных процессов. Снабберные цепи служат также для снижения влияния паразитной генерации, из-за которой происходит нагрев обмоток трансформатора или транзисторных ключей. Ёмкость снаббера позволяет снизить скорость нарастания напряжения.

Номинал снабберного конденсатора $C_{\text{снаб}}$ рассчитывается исходя из уровня перенапряжения U и значения запасенной в паразитной индуктивности L энергии и пикового тока I :

$$C_{\text{снаб}} = \frac{L \times I^2}{U}$$

Существуют несколько конфигураций снабберных цепей (рис. 26). Чаще всего используется высоковольтный пленочный конденсатор, обладающий

низкой собственной индуктивностью. Для низковольтных цепей с МОП-транзисторами дополнительно может устанавливаться резистор, для снижения добротности паразитного колебательного контура. В цепях с тиристорными ключами устанавливается быстродействующий диод параллельно резистору. Диод здесь служит для ограничения тока разряда и разделения зарядных цепей.

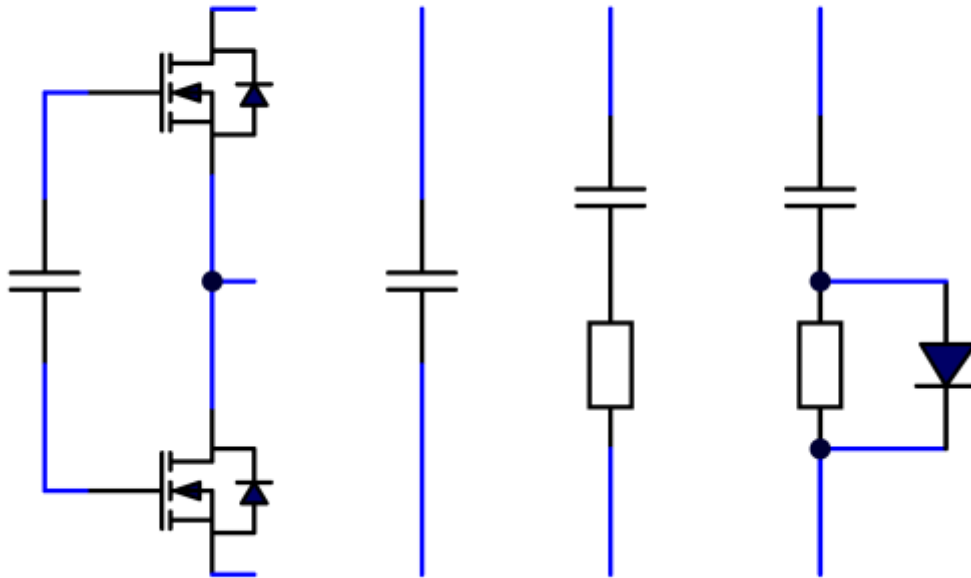


Рис. 29. Конфигурации снабберных цепей

В данной работе в качестве снаббера используются высоковольтные пленочные конденсаторы. По одному на каждое плечо мостовой схемы. Конденсаторы имеют емкость в 0,47 микрофарад и допускаются к работе в цепях с напряжением до 400 вольт.

3.3. Расчет и намотка трансформатора

Работа импульсного источника питания невозможна без импульсного трансформатора. Импульсные трансформаторы принимают высокочастотные импульсы, посылаемые силовыми ключами на первичную обмотку, и изменяют уровень и полярность образуемого импульса на вторичной обмотке с минимальным искажением.

Импульсный трансформатор имеет ряд особенностей в своей работе. Самая главная заключается в кратковременности режима работы. Из-за высокой

скорости изменения магнитного потока возникают вихревые токи значительной величины, а, следовательно, и повышаются потери энергии. На характер формирования фронта импульса влияет не только индуктивный, но и ёмкостной эффект в обмотках трансформатора. Для малых длительностей импульса характерным является поверхностный эффект в проводах обмоток.

Материалом магнитопровода для импульсных трансформаторов обычно выбирают феррит. Магнитопроводы, выполненные из ферритовых материалов, имеют повышенное удельное сопротивление и не имеют потерь от вихревых токов.

Для снижения остаточной индукции применяется воздушный зазор между частями магнитопровода. Введение немагнитного зазора позволяет функционировать при приращении индукции, близких к индукции насыщения (рис. 30).

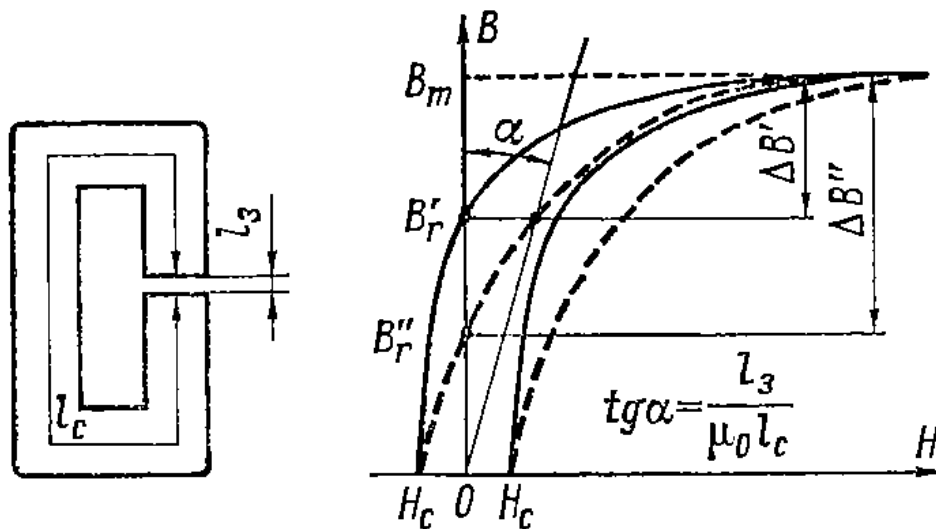


Рис. 30. Трансформатор с немагнитным зазором. Здесь l_3 – ширина зазора, B_m – индукция насыщения [28]

В данной работе применен трансформатор броневого типа с магнитопроводом из ферритового сердечника ETD 49/25/16 из материала N87 производства компании Epcos (рис. 31).

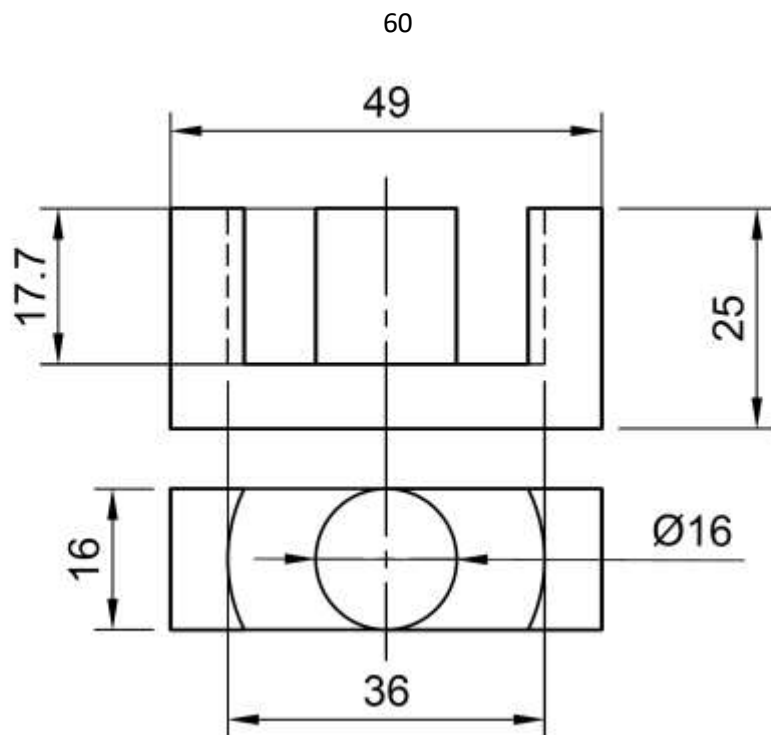


Рис. 31. Габаритные размеры сердечника

На сердечник надета изолирующая катушка из капролона. На катушку поверх фторопластовой изоляции толщиной в 2 мм, была намотана вторичная обмотка, состоящая из 100 витков эмалированной медной проволоки марки ПЭТВ с сечением 0,15 мм. Поверх вторичной обмотки идет изолирующий слой из фторопласта также толщиной 2 мм. Далее намотана первичная обмотка, состоящая из 8 витков провода МГТФ с сечением 0,33 мм.

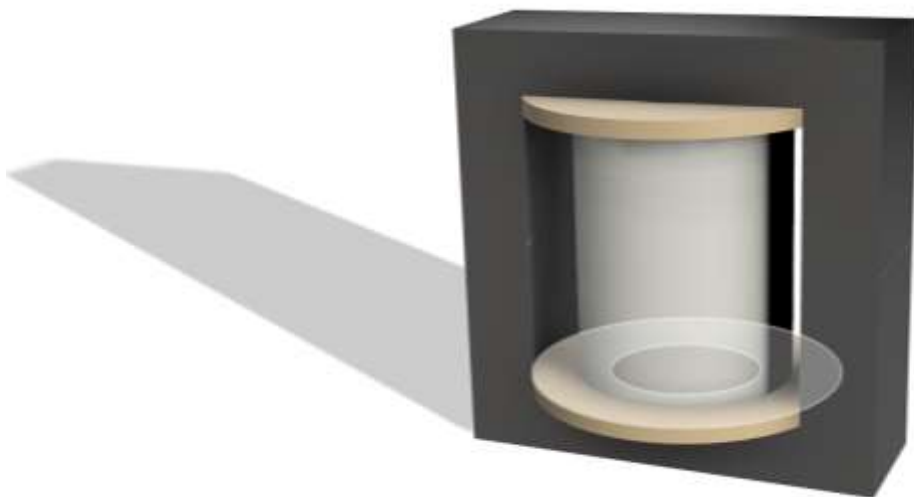


Рис. 32. Внешний вид трансформатора (трехмерная модель)

3.4. Обзор экспериментальной установки

В первую очередь в экспериментальной установке надо отметить сам воздушный ионизатор. Прибор состоит из 5 компонентов (рис. 33).

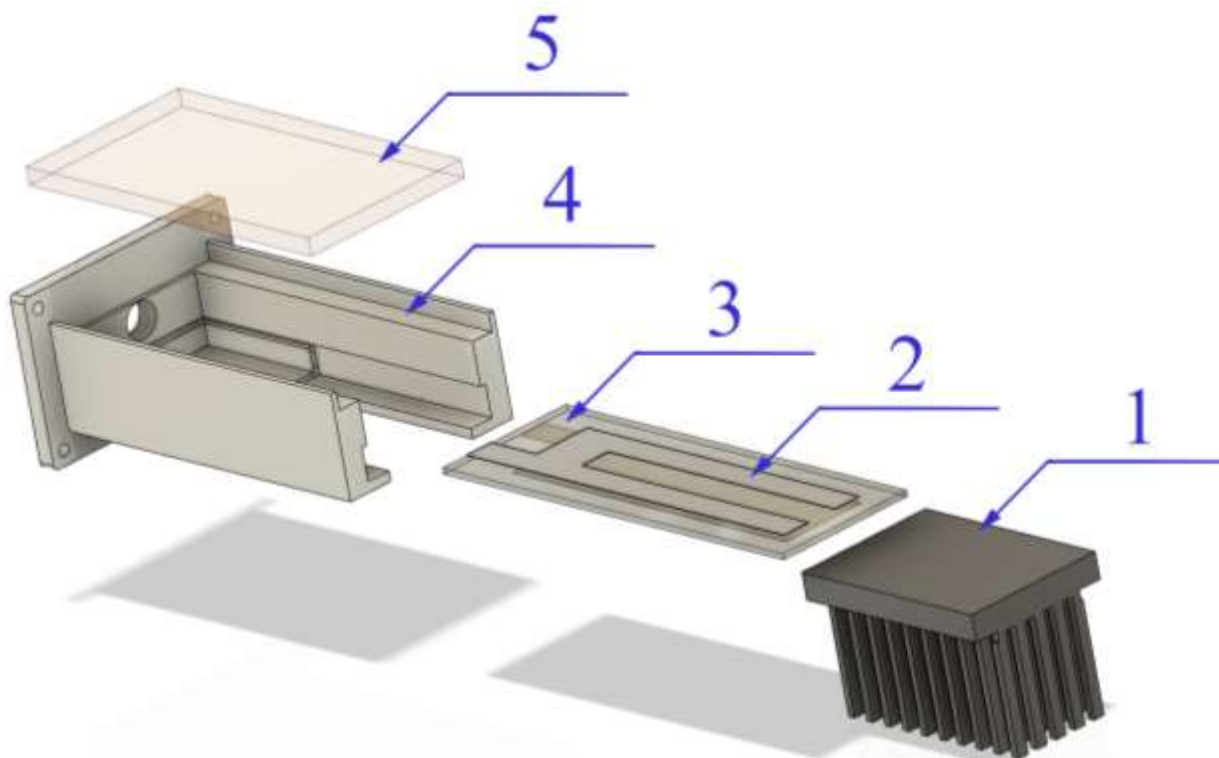


Рис. 33. Взрыв-схема прибора

Корпус прибора (4) изготовлен из ABS пластика методом трехмерной печати. В данном корпусе предусмотрены посадочные места для плазмохимического реактора (3) с электродной системой (2), радиатора охлаждения реактора (1) и верхней прозрачной стенкой (5). Также в корпусе предусмотрено отверстие для подачи воздуха от компрессора диаметром 12 мм. Предусмотрен и фланец с 4 отверстиями под болты М3 для удобства крепления прибора.

Верхняя стенка (5) изготовлена из акрила и обеспечивает обзор протекающих внутри реактора процессов. Ввиду сильного нагрева плазмохимического реактора был установлен радиатор (1). Как показали эксперименты, радиатор оказывает существенное влияние на работу прибора. Без использования радиатора стеклянная пластина сильно нагревается, порядка

80 градусов за 20 секунд работы. При длительной эксплуатации прибора без радиатора может произойти повреждение диэлектрика, а также оплавление пластикового корпуса изделия.

Для корректной работы прибора в экспериментальном режиме была собрана следующая установка (рис. 34).

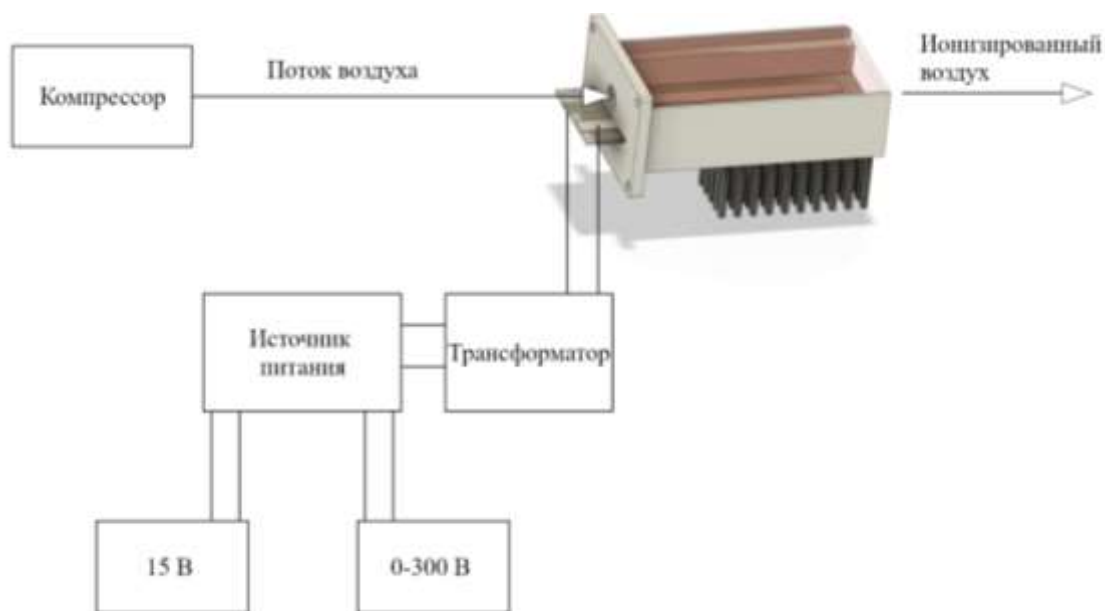


Рис. 34. Блок-схема установки

В силу отсутствия дежурного источника питания, для работы микросхемы TL494 был использован внешний блок питания на 15 вольт. Также вместо подключения напрямую к сети 220 В был использован регулируемый блок питания, что позволило проверить работу прибора при разных величинах входного напряжения.

Индукцированный воздушный поток создавался с помощью компрессора. Поток воздуха двигался параллельно плоскости реактора на небольшом расстоянии от электродов.

Глава IV. Характеристика результатов исследования

4.1. Характеристика работы системы

При подаче напряжения 15 вольт на вход питания схемы управления ток потребления составлял 25 миллиампер. Для ввода в эксплуатацию прибора, необходимо установить рабочую частоту и ширину импульса, подаваемого на затвор транзисторов верхнего плеча (VT1, VT3) (см. рис. 24).

Рабочая частота устанавливалась с помощью переменного резистора RT (см. рис. 19). Ширина импульса должна составлять 750 ± 20 наносекунд на полувывоте (рис. 35). Она регулируется с помощью резистора R₁ (см. рис. 19), причем она может быть изменена только после подстройки частоты.

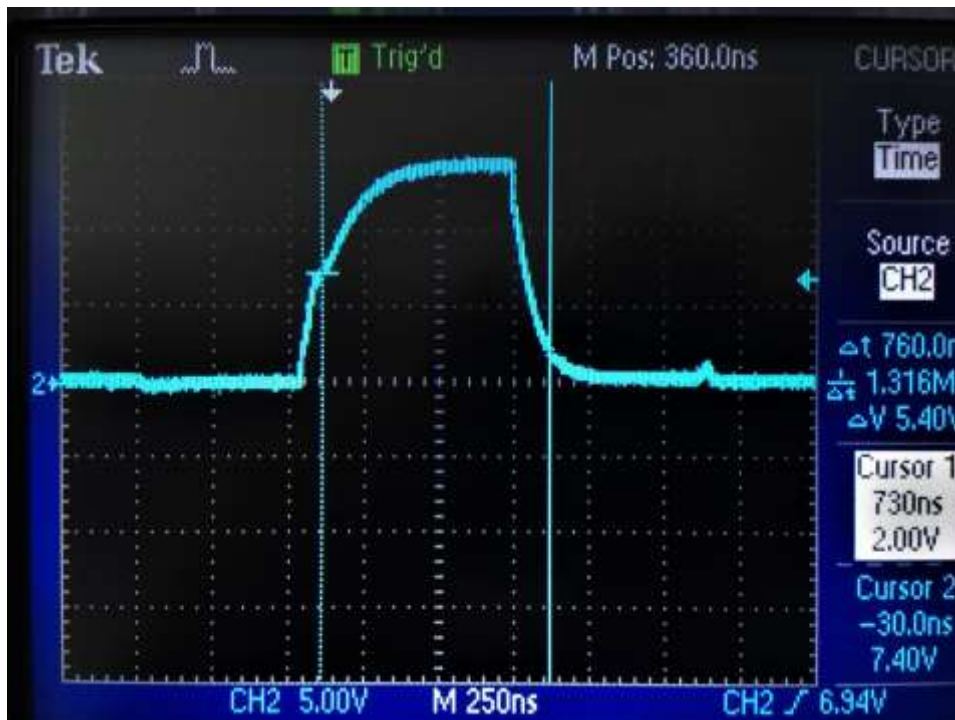


Рис. 35. Форма сигнала на затворе транзистора VT1

Осциллограммы с затворов транзисторов продемонстрированы на рис. 36. Голубым показана форма импульса на затворе верхнего ключа. Фиолетовым на затворе нижнего ключа. Отчетливо видно мертвое время, препятствующее прохождению сквозных токов.

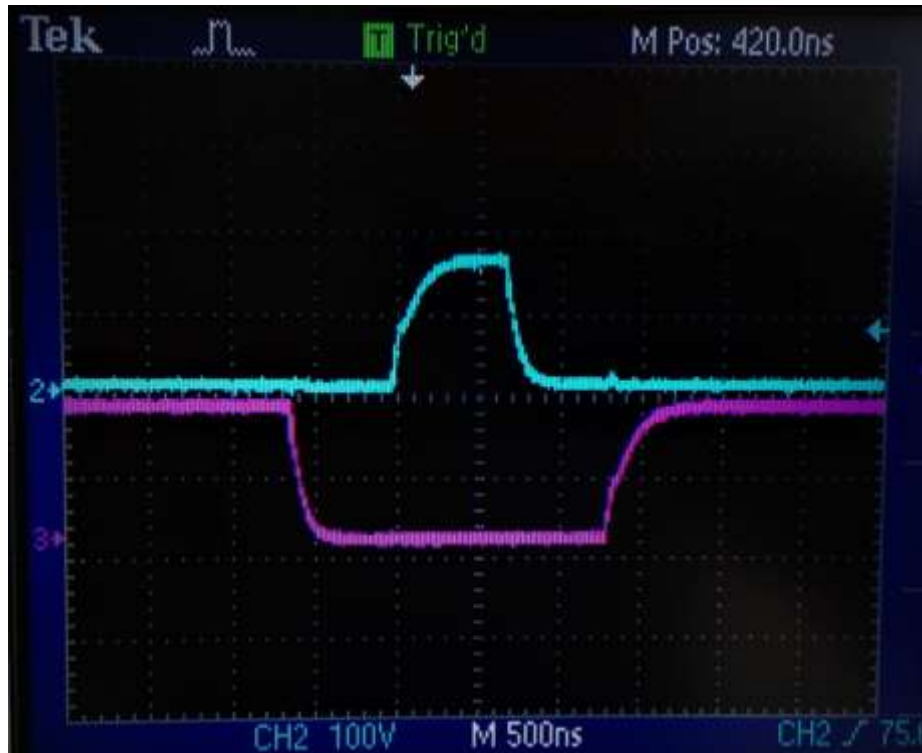


Рис. 36. Форма сигнала на затворах транзисторов VT1-VT2 (рис. 24)

В итоге на выходе трансформатора образуется биполярное импульсное напряжение (рис. 37).

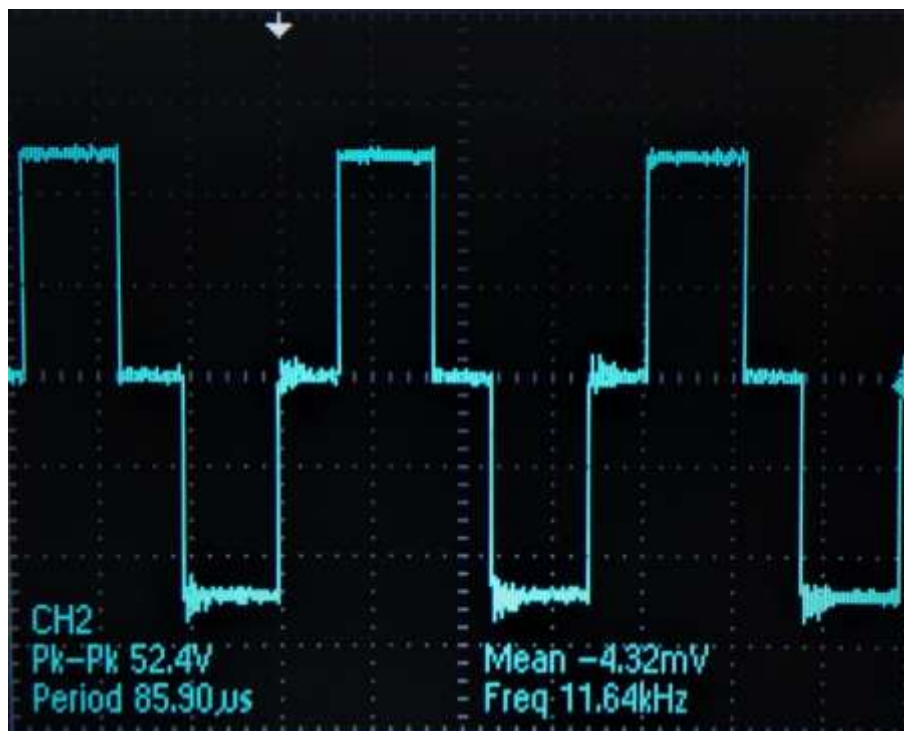


Рис. 37. Форма сигнала на выходе трансформатора

В итоге, при подключении выводов трансформатора к электродам плазмохимического реактора, появляется поверхностный барьерный разряд (рис. 38). Ток потребления от лабораторного источника питания не превышает 150 миллиампер при напряжении 300 вольт постоянного тока. На выходе трансформатора напряжение составляет порядка 6 киловольт.

Плазма образуется обычно равномерно, по всему периметру высоковольтного электрода. Ширина образующегося разряда порядка 1мм. Как видно, из-за плохого контакта электрода с поверхностью могут появляться промежутки неоднородности в разряде. Также стоит отметить поведение разряда на углах электрода, что тоже сказывается на однородности разряда.

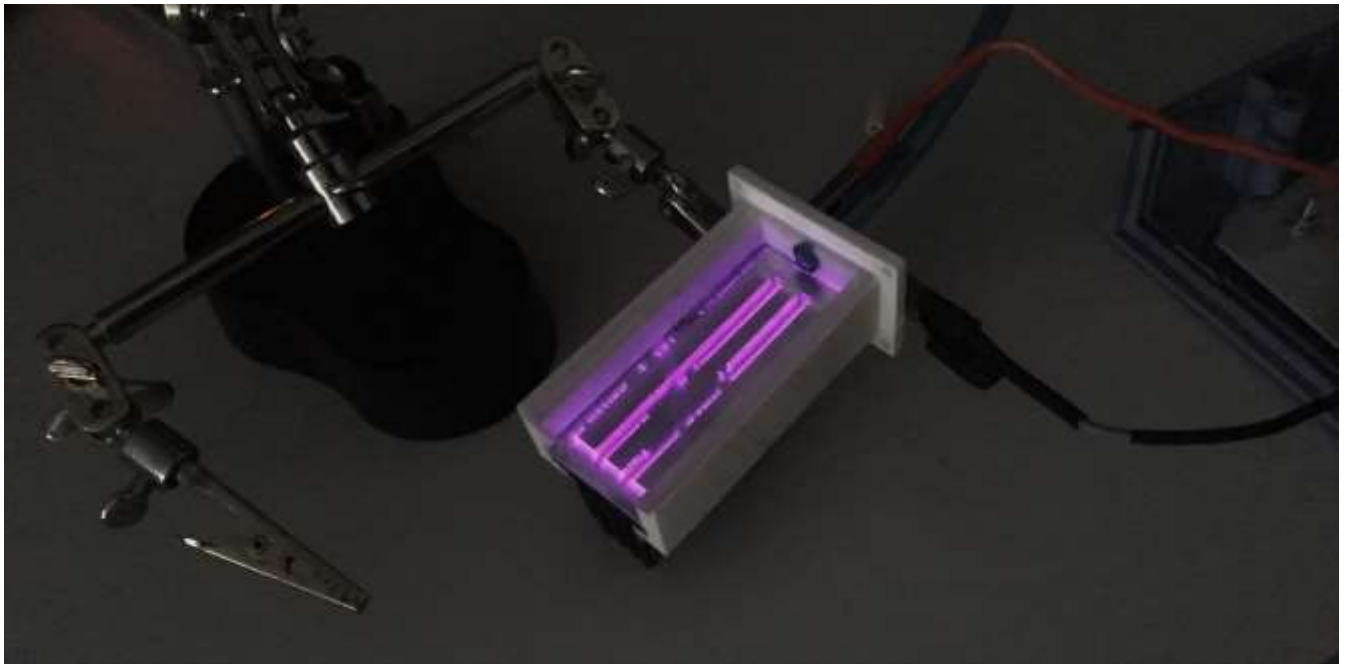


Рис. 38. Фотография прибора в процессе работы

Во время работы прибора практически сразу же начинает ощущаться запах озона. Нагрев радиатора охлаждения реактора не очень сильный. Спустя 30 секунд работы температура была около 60 градусов. Выходящий ионизированный воздух имеет температурой немногим выше комнатной.

В процессе лабораторных исследований прибора были обнаружены некоторые недостатки в схеме управления. А именно, не было возможности

включать и выключать прибор непосредственно с платы управления и не было защит от перегрева радиатора охлаждения реактора или транзисторов и защиты от короткого замыкания, которое может произойти вследствие нарушения целостности диэлектрика. Однако стоит заметить, что при отсутствии ошибок в монтаже нагрева компонентов внутри схемы управления быть не должно. Так что для доработки остается схема включения прибора, дополнение схемы дежурным источником питания, схемами защиты от короткого замыкания и тепловой защиты, а также собственного вентилятора для создания потока воздуха через плазмохимический реактор.

Также для конечного прибора следует заменить вид электродов реактора для более эффективной ионизации воздушного потока. И максимально возможно уменьшить габариты прибора для возможности его портативного использования.

4.2. Пути модернизации схемы

Поскольку основной задачей является создание портативного устройства, то модернизация устройства должна минимально увеличивать габариты прибора. Учитывая это, источник питания для дежурного напряжения 15 вольт можно построить на схеме однотактного импульсного высокочастотного преобразователя (рис. 39). Такой блок питания обладает минимальными габаритами и небольшой мощностью в 15-20 ватт.

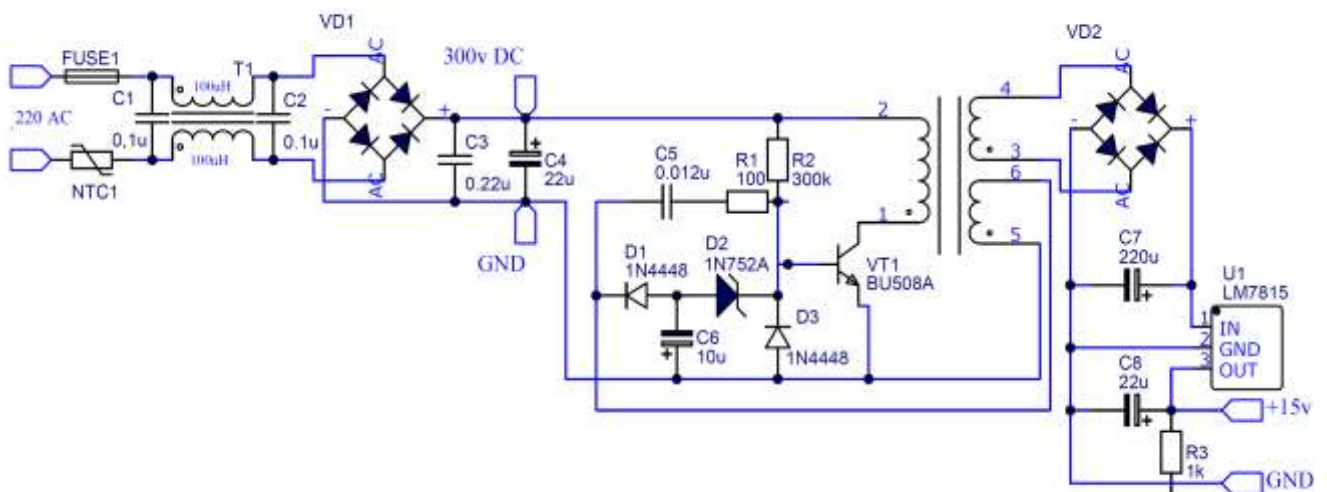


Рис. 39. Схема дежурного источника питания

На транзисторе BU508A (аналог KT872A) собран автогенератор, работающий, в зависимости от ёмкости конденсатора C5, на частоте от 20 до 40 кГц. Трансформатор должен быть выполнен с немагнитным зазором. Расчетное количество витков – 600 на первичной обмотке, 44 витка на вторичной (3-4) и еще 10 витков на обмотке (5-6) для питания автогенератора. На выходе стоит линейный стабилизатор LM7815, что позволяет получать фиксированное напряжение в 15 вольт на выходе схемы.

Обеспечить плавный запуск генерации плазмы и снизить нагрузку на выходные транзисторы позволяет схема мягкого старта (soft start) (рис.40).

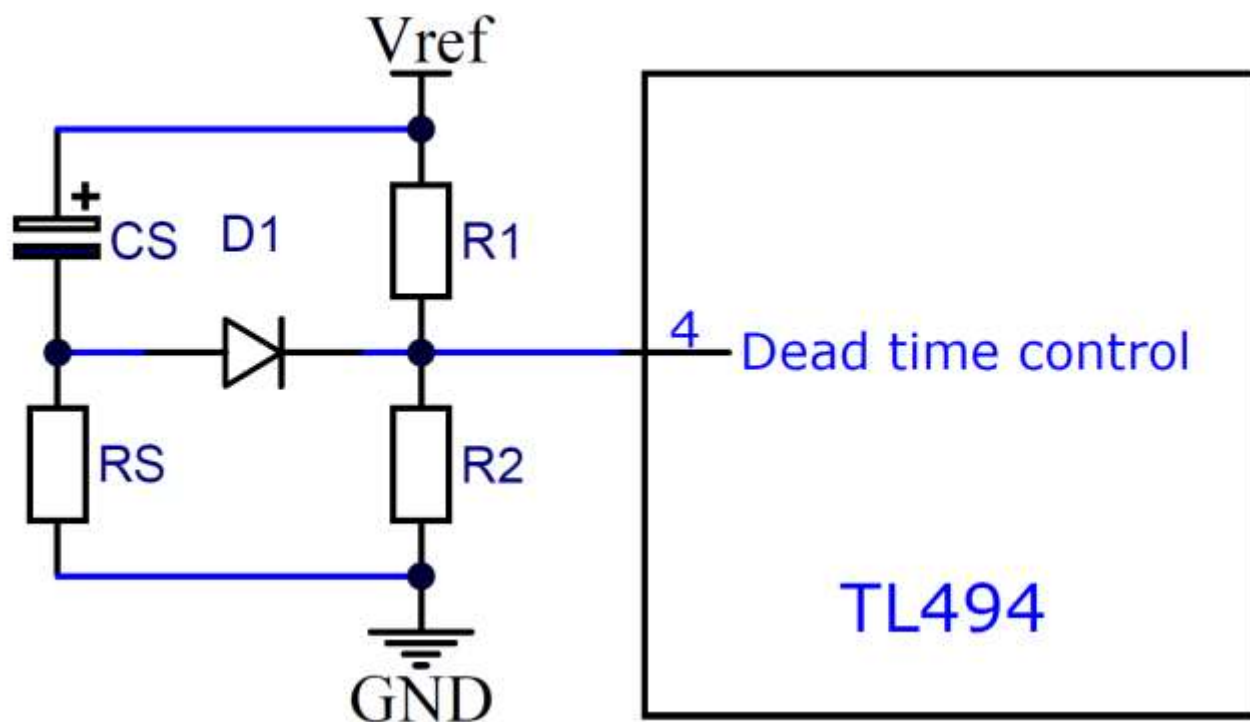


Рис. 40. Схема мягкого старта

В данной схеме помимо уже установленного резистивного делителя напряжения $R1$ - $R2$ добавляется конденсатор $C5$, который будет, заряжаясь, плавно повышать напряжение на входе 4 микросхемы. Тем самым обеспечивается плавное нарастание ширины импульсов на выходе микросхемы (рис. 41).

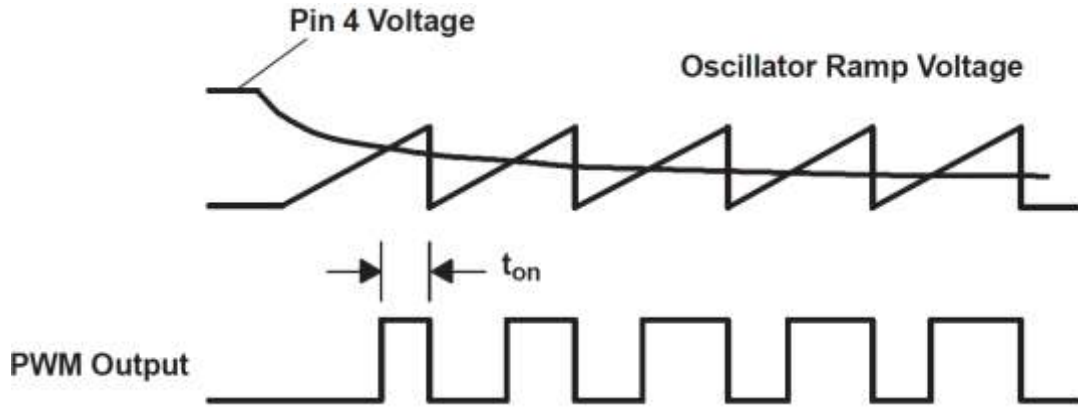


Рис. 41. Зависимость ширины выходных импульсов от напряжения на выводе 4

Для вычисления ёмкости конденсатора C_s можно воспользоваться следующей формулой:

$$C_s = \frac{t}{R_s},$$

где t – время мягкого старта.

Время мягкого старта берется из расчета:

$$T = \frac{1}{20 \text{ кГц}} = 50 \text{ мкс},$$

где T – период, равный 50 микросекундам при тактовой частоте 20 кГц.

Тогда для старта на протяжении 50 импульсов время будет

$$t = 50 \times 50 = 2500 \text{ мкс}$$

А ёмкость конденсатора C_s , при значении сопротивления резистора R_s в 1 кОм:

$$C_s = \frac{2500 \times 10^{-6}}{10^3} = 2,5 \text{ мкФ}$$

Что касается запуска ШИМ-контроллера, то его можно осуществлять, коммутируя линию питания кнопкой без фиксации, от которой также запускать и встроенный вентилятор.

Схема защиты от короткого замыкания или от перегрузки по току представлена на рис. 42. В данном случае используется встроенный в TL494 усилитель ошибки на выводах 15 и 16. К выводу 16 подключен делитель напряжения R1-R2, задающий напряжение, что повлечет за собой отключение генерации импульсов в микросхеме. Резистор R0 является токовым шунтом, падение напряжения на котором и служит для контроля за протекающим током. Таким образом при превышении напряжения с токового шунта на выводе 15 над напряжением, установленным делителем, на выводе 16 приведет к образованию логической единицы на усилителе ошибки. А, как было сказано ранее, логическая единица на выходе усилителя ошибки, а значит и на входе DA4 влечет прекращение генерации управляющих импульсов.

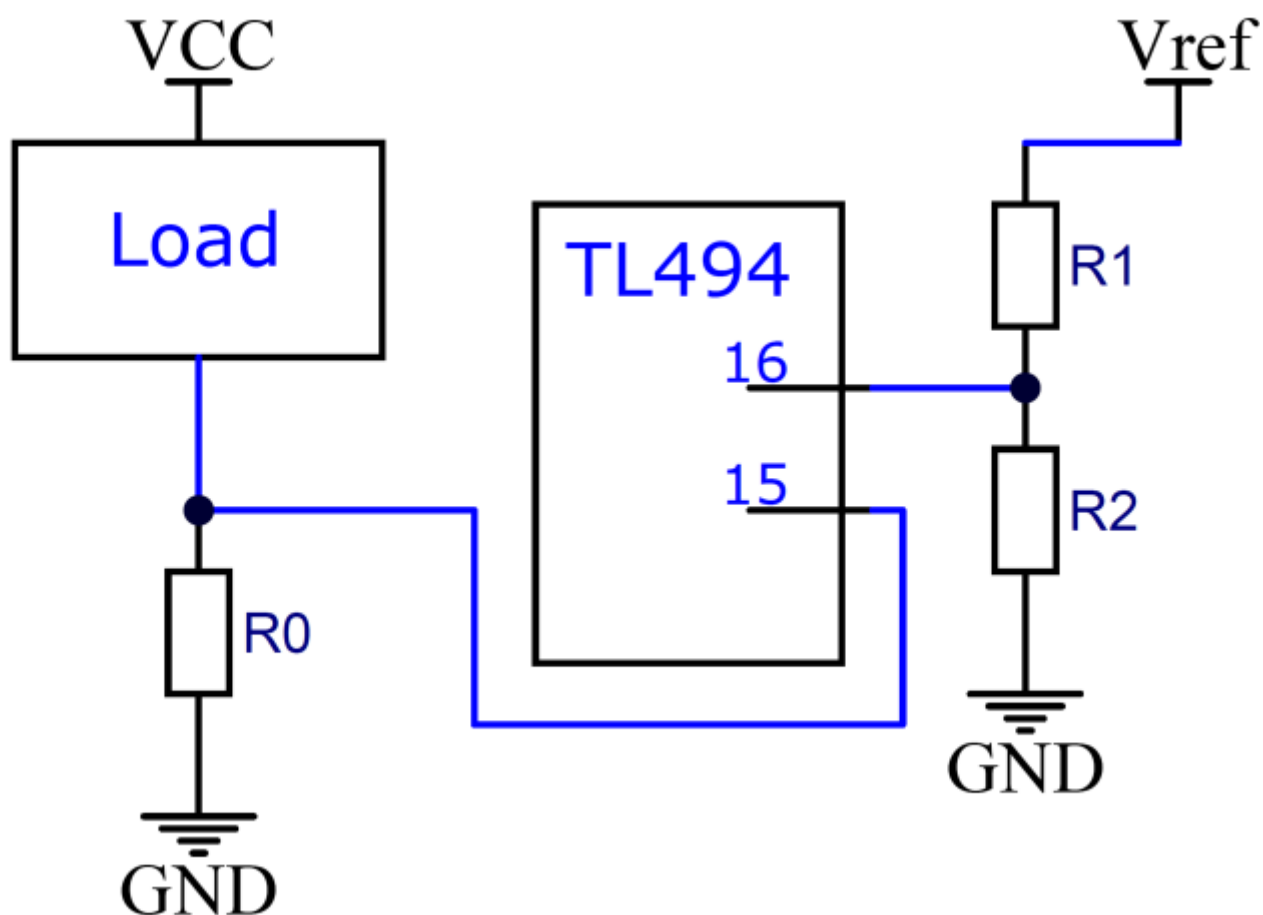


Рис. 42. Схема защиты от короткого замыкания

Аналогичным образом устроена защита от перегрева (рис. 43). Только вместо шунта используется термистор с отрицательным температурным

коэффициентом. Это означает, что при повышении температуры термистора, его сопротивление уменьшается. Соответственно увеличивается напряжение на делителе NTC-R0 и на выводе 2. Далее защита работает аналогично предыдущей.

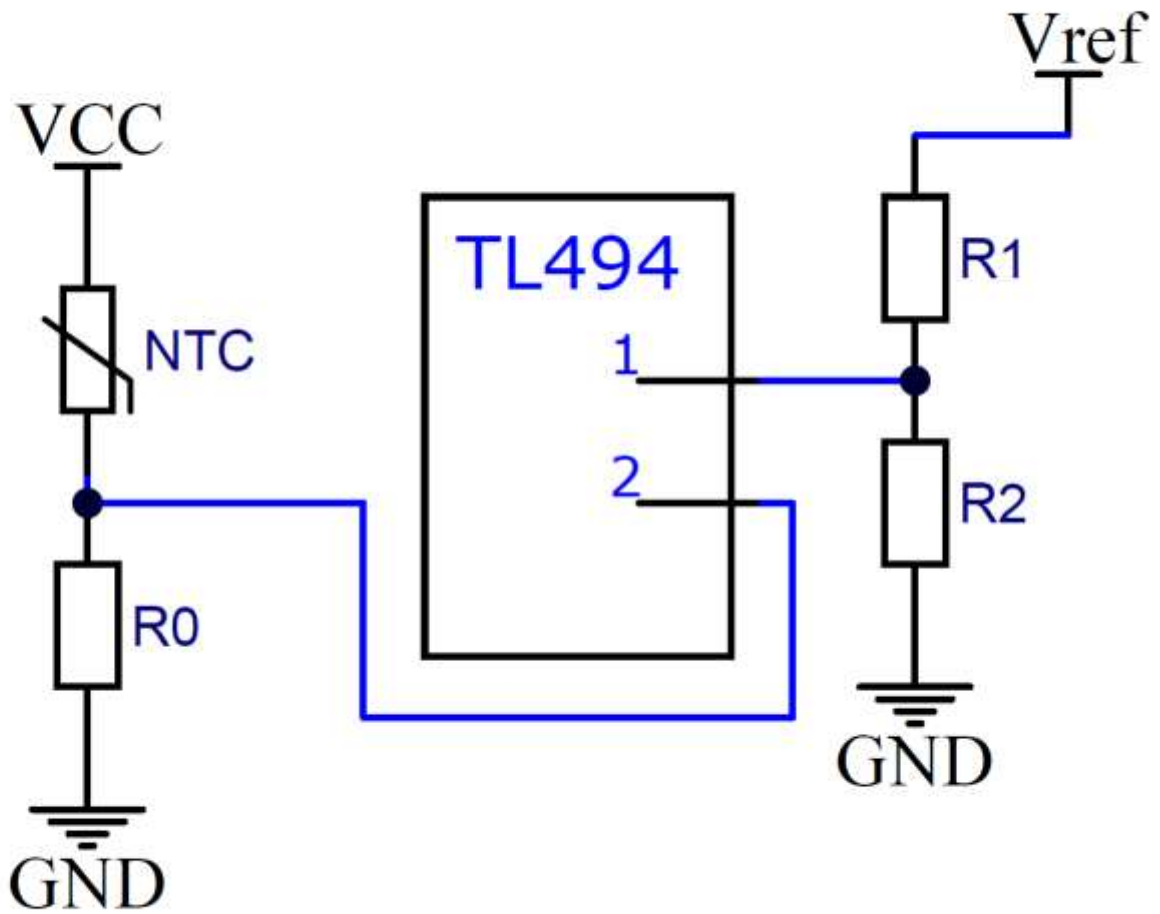


Рис. 43. Защита от перегрева

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был разработан прототип воздушного ионизатора и исследованы его возможности. Были проведены исследования работы прибора на разных тактовых частотах и с разными типами плазмохимического реактора. По итогу был выбран один, оптимальный тип реактора, позволяющий обеспечить необходимую энергоэффективность и отвечающий заданным габаритам установки.

Был собран источник питания на базе ШИМ-контроллера TL494. Благодаря гибкой подстройке необходимых параметров и надежной схемотехнике, этот источник хорошо показал себя в процессе испытаний воздушного ионизатора.

В целях безопасной работы и повышения надежности был спроектирован корпус прибора. Для защиты плазмохимического реактора от внешних воздействий и для удобства и безопасности работы с ним был напечатан корпус из ABS пластика. Также был использован отдельный корпус для защиты схемы питания устройства.

Исходя из предоставленной информации об эффективности применения озонаторов в терапии септических ран и дерматологии, можно сделать вывод об актуальности приборов генерации озона. Разработанное устройство может использоваться для эффективного производства озонкислородной смеси в малых количествах, необходимых для местного применения. Особенно стоит отметить портативность и низкие энергозатраты прибора по сравнению с современными промышленными аналогами. Также данный прибор оставляет широкие возможности для дальнейшего усовершенствования.

В дальнейшем планируется дополнение прибора замкнутой системой рециркуляции воздуха. Это необходимо для снижения риска повреждения озоном органов дыхания пациента и для более экономичного расхода смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — Издательство Московского университета Москва, 1989. — 176 с.
2. Кобозев Н.И., Емельянова Г.И., Атякшева Л.Ф. и др. // Ж. физ. хим. 1975. Т. 49, №12. С. 3119
3. Багиров М.А., Нуралиев Н.Э., Курбанов М.А.// ЖТФ. 1972. Т. 43, №3. С. 629-634.
4. Багиров М.А., Курбанов М.А., Шкилев А.Д., Нуралиев Н.Э.// ЖТФ. 1971. Т.41, №6. С. 1287-1291.
5. Курбанов М.А. Электрический разряд в воздушном зазоре, ограниченном диэлектриками: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Баку, 1974
6. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона.- М:Изд-во МГУ. — издательство Московского университета Москва, 1998. — 480 с.
7. Гибалов В.И., Питч Г.// Ж. физ. хим. 1994. Т.68, №5. С.931.
8. М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения.// УФН. 2003. Т.173. №2.
9. М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Ткачев, Д.В. Шитц, С.И. Яковенко. О формировании конусообразных микрозарядов в $KrCl$ и $XeCl$ эксилампах.//Журнал технической физики. 2004. Т.74. №6.
10. П. Н. Казанский, А. И. Климов, И. А. Моралев, “Управление воздушным потоком вблизи кругового цилиндра с помощью ВЧ-актуатора. Влияние параметров разряда на аэродинамическое сопротивление цилиндра”, ТВТ, 50:3 (2012), 346–353; High Temperature, 50:3 (2012), 323–330.

11. Койков, С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков / С.Н. Койков, А.Н. Цикин. - Л.: Энергия, 1968. - 186 с.
12. Cadle K.D., Ledford M.// Air and Water pollution. 1966. V.10. P.25.
13. Силкин Е.М. Синтез озона в электрических разрядах.// Компоненты и технологии. 2008. №6.
14. Fetner R.H., Ingols R.S.// J. Gen. Microbiol. 1956. V.15. P.381.
15. Матюнин А.Н. Исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами. дис. ... канд. тех. наук. Чебоксры, 2019.
16. Густов, А.В. Озонотерапия в неврологии /А.В. Густов [и др.]. — Н. Новгород : Литера, 2001. —180 с.
17. Хуранов А.А. Озонотерапия в гнойной хирургии.// Успехи современного естествознания. 2004. №3.
18. В.Х. Фазылов, Н.В. Галеева, А.И. Загидуллина, И.Н. Таиров. Озонотерапия в клинике инфекционных болезней.// Практическая медицина.2013. №5.
19. Разумовский С.Д. Озон в биологии и медицине: тез. док. I Всерс. науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 1995. – С. 4-5.
20. Blanchard J.S. //Ann. Rev. Biochem. — 1996. — Vol. 65. — P. 215-391.
21. Белянин И.И., Шмелев И.И. Озонотерапия затянувшихся пневмоний // Росс. мед. журнал. — 2010. — 1. — С. 6-11.
22. Недогода В.В., Свириденко О.Ю., Разваляева О.В. и др. Влияние озонотерапии на перекисное окисление липидов, системную и внутрипеченочную микроциркуляцию при хронических гепатитах и циррозах печени. Озон и методы эфферентной терапии в медицине: тез. док. III Всерос. науч.-практ. конф. — Н. Новгород, 2000. — С. 80-81.
23. Разваляева О.В. Скворцов В.В. Динамика клинических и лабораторных показателей у больных с циррозом печени на фоне озонотерапии. Актуальные проблемы медицины: тез. докл. XIV итоговой науч. конф. мол. ученых ВМА. Волгоград 5-7 мая // ВМА. —1997. — с. 59.
24. Буеверов А.О., Богомоллов П.О., Буеверова Е.Л. Гепатотоксичность

антибактериальных препаратов в терапевтической практике.// Клини. микробиол. антимикроб. химиотер. 2015. Т.17. №3.

25. Герейханова Л.Г., Ломоносов К.М., Мельникова Ю.Г. Результаты кислородно-озоновой терапии витилиго// Российский журнал кожных и венерических болезней. 2017; 20(5).

26. Кошелева И.В. Кислородно-озоновая терапия хронических иммунозависимых дерматозов. дис. ... док. мед. наук. Москва, 2013.

27. Стручков А.А. Применение озона при местном лечении ожоговых ран. дис. ... к. мед. наук., Н. Новгород. 2007.

28. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 112 с., ил.