

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименования института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроника и робототехника
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРА

Обучающийся

В.Р. Дудник

(Инициалы Фамилия)

(личная
подпись)

Руководитель

А.К. Кудинов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы
Фамилия)

Тольятти 2023

Аннотация

Название бакалаврской работы: «Источник питания для лазера».

Бакалаврская работа состоит из введения, двух разделов, заключения, таблицы, списка используемой литературы с учетом зарубежных источников и графической части на 6 листах формата А1.

Ключевым вопросом бакалаврской работы является проектирование источника питания для лазера. Уделено особое внимание вопросам безопасности эксплуатации разработанного устройства.

Цель работы - улучшение качества жизни клиентов путем удовлетворения их потребности в хорошем внешнем виде. Эта цель достигается путем разработки источника питания и применения углекислотного лазера в косметологии.

Выпускную работу можно разделить на несколько логически связанных частей: анализ существующих источников питания; разработка электрической принципиальной схемы; выбор элементов схемы; расчет всех данных для определения мощности источника питания; проектирование и построение всех схем.

В заключении хотим подчеркнуть, что данная работа актуальна не только в улучшение качества жизни клиентов, но и в том, что разработанный источник содержит малое количество деталей, стоит недорого 4000 руб., его вес равен 45,259 кг., а габариты составляют 410x450x414 мм.

Abstract

The title of the graduation work is: "Power supply for the laser".

The graduation work consists of an introduction, two chapters, a conclusion, a table, a list of used literature, taking into account foreign sources and a graphic part on 6 sheets of A1 format.

The key issue of the thesis is the design of a power source for a laser. Particular attention is paid to the safety issues of operation of the developed device.

The aim of the work is to improve the quality of life of clients by satisfying their need for a good appearance. This goal is achieved through the development of a power source and the use of a carbon dioxide laser in cosmetology.

The graduation work may be divided into several logically connected parts: analysis of existing power sources; development of an electrical circuit diagram; selection of circuit elements; calculation of all data to determine the power of the power source; design and construction of all schemes.

Finally, we want to emphasize that this work is relevant not only in improving the quality of life of customers, but also in the fact that the developed source contains a small number of parts, costs 4000 rubles inexpensively, its weight is 45.259 kg, and its dimensions are 410x450x414 mm.

Содержание

Введение.....	6
1 Состояние вопроса	7
1.1 Лазер.....	7
1.1.1 Углекислотный лазер, применение в медицине	8
1.1.2 Виды углекислотных лазеров	9
1.1.3 Применение углекислотного лазера в медицине.....	10
1.1.4 CO ₂ лазер (на углекислом газе).....	11
1.1.5 Принцип работы лазерных трубок	12
1.1.6 Источник питания	14
1.2 Аналоги	15
2 Основная часть	16
2.1 Расчет параметров лазера.....	16
2.1.1 Вычисление требуемой выходной мощности излучения	17
2.1.2 Расчет ватт-амперной характеристики	18
2.1.3 Расчет выдаваемой мощности излучения (пульсации).....	19
2.1.4 Вычисление значения электрического тока (величины пульсаций)	19
2.1.5 Свойства электрического напряжения, которые связаны с его изменениями или колебаниями	20
2.1.6 Характеристики динамического сопротивления	23
2.1.7 Расчет электрической мощности (полезной)	24
2.1.8 КПД	25
2.2 Разработка ИП для лазера	26

2.2.1 Структурное описание ИП для лазера	26
2.2.2 Функциональная модель ИП для лазера.....	28
2.2.3 Защитная цепь	29
2.2.4 Определение фильтра (сглаживающего).....	31
2.2.5 Расчет схемы мостового выпрямителя	32
2.2.6 Определение параметров трансформатора (силового)	34
2.2.7 Определение схемы зажигания электрического разряда в излучателе	43
2.2.8 Выбор компонентов (для передачи информации, коммутации и обеспечения безопасности)	46
2.2.8.1 Определение информационного элемента	46
2.2.9 Выключатель и его выбор	50
2.2.10 Предохранитель и его выбор	51
2.2.11 Заземление	53
2.3. Удельные характеристики ИП для лазера.....	54
2.3.1 КПД ИП для лазера.....	54
2.3.2 Удельная массовая мощность ИП для лазера	55
2.3.3 Удельная объемная мощность ИП для лазера	55
Заключение	56
Список используемых источников.....	57

Введение

Луч, создаваемый углекислотным лазером, хорошо поглощается водой, которая составляет более 70% тканей человеческого организма. Это позволило СО₂-лазеру успешно заменить обычный скальпель и стать основой лазерной хирургии.

Углекислотный лазер возбуждает молекулы углекислого газа, которые испускают лазерное излучение. Лазерный луч взаимодействует с водой в тканях, что позволяет его использовать для удаления образований на коже. Лазер стимулирует регенерацию кожи и улучшает ее внешний вид.

В косметологии эти свойства углекислотного лазера используются для лазерной шлифовки и удаления различных образований на коже. Лазерный луч испаряет верхний слой эпидермиса, стимулируя производство коллагена в более глубоких слоях кожи. Это способствует быстрой регенерации кожного покрова, восстановлению тонуса и структуры кожи, выравниванию поверхности, устранению морщин, растяжек, пигментных пятен, а также сглаживанию рубцов и шрамов. Лазерный луч в косметологии работает на основе селективного поглощения целевой тканью и превращения световой энергии в тепловую энергию. Это позволяет точно воздействовать на конкретные проблемные области кожи и достигать желаемых результатов без значительного повреждения окружающих тканей.

Лазерный луч в косметологии генерируется в активной среде лазерного устройства, которая содержит углекислый газ. Молекулы углекислого газа возбуждаются и при переходе на нижний энергетический уровень испускают фотоны, образуя лазерное излучение. Лазерный луч усиливается и направляется на целевую область кожи, где он взаимодействует с тканью.

Целью выпускной квалификационной работы является улучшение качества жизни клиентов путем удовлетворения их потребности в хорошем внешнем виде. Эта цель достигается путем разработки источника питания и применения углекислотного лазера в косметологии.

1 Состояние вопроса

1.1 Лазер

Генерация когерентного света путем оптического усиления представляет собой сущностную функцию, которую выполняет специализированное устройство - лазер. Лазеры могут быть различных типов в зависимости от используемой среды, среди которых выделяют газовые, волоконные, твердотельные, диодные, эксимерные и лазеры на красителях, но все они используют общие базовые компоненты. Принцип работы лазера представлен на рисунке 1.

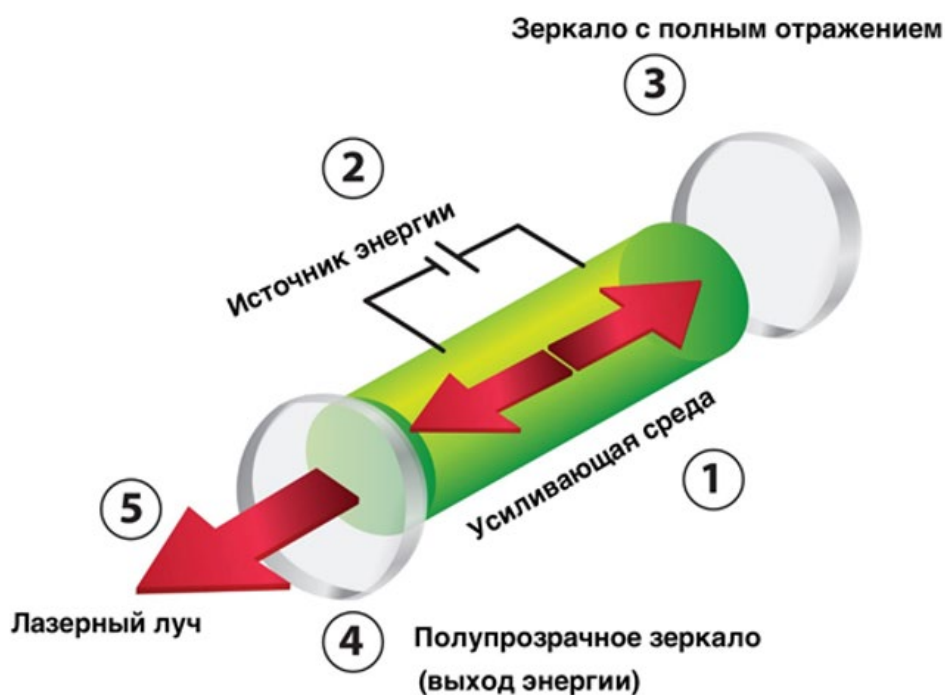


Рисунок 1 - Принцип работы лазера

Лазеры играют ключевую роль в создании многих устройств, которые мы используем ежедневно. Например, такие товары широкого потребления, как «Blu-Ray и DVD-плееры, используют лазерную технологию для считывания информации с дисков» [3, с. 5]. Сканеры штрих-кодов также используют лазеры для обработки информации.

1.1.1 Углекислотный лазер, применение в медицине

Лазеры играют важную роль в многих изделиях, которые мы используем ежедневно. Например, продукты широкого потребления, такие как «Blu-Ray и DVD-плееры, используют лазерную технологию для чтения информации с дисков» [3, с. 5]. Сканеры штрих-кодов также работают на основе лазеров для обработки информации. Кроме того, лазеры используются во многих хирургических процедурах, таких как лазерная коррекция зрения LASIK. В промышленности лазеры используются для резки, гравировки, сверления и маркировки широкого спектра материалов. Углекислотный лазер показан на рисунке 2.



Рисунок 2 - Углекислотный лазер

Углекислотный лазер относится к категории инфракрасных лазеров, поскольку производит излучение, которое показывается длиной волны 10,6 мкм., принадлежащей к среднему инфракрасному диапазону. При воздействии лазерного луча на кожу происходит быстрое испарение воды, сопровождающееся абляцией верхнего слоя эпидермиса. В центре зоны воздействия температура кожи может достигать 150-200°C, что приводит к быстрому разрушению и отмиранию тканей в краевой зоне. Узнав о преимуществах углекислотного лазера, становится понятно, что его коагулирующие свойства несравнимы: мелкие сосуды в зоне действия моментально запаиваются, а крупные вызывают лишь небольшие точечные кровотечения, что является одним из его преимуществ.

1.1.2 Виды углекислотных лазеров

Углекислотные лазеры, используемые в медицине, подразделяются на два вида: непрерывные и импульсные, в зависимости от типа генерации лазерного излучения. Непрерывные лазеры удобны для хирургических операций, но требуют большого опыта врача, чтобы избежать перегрева окружающих тканей. Импульсные лазеры позволяют более точно настроить воздействие на кожу, что особенно важно для косметологических процедур, таких как лазерное омоложение. При выборе углекислотного лазера для салона или клиники необходимо обратить внимание на технические характеристики и параметры, чтобы обеспечить максимальную эффективность и безопасность процедур.

Мощность лазерного устройства является одним из ключевых параметров является, выбирать аппараты с мощностью не менее 20 Вт. Такая мощность позволяет делать самые простые шлифовочные операции так и самые тяжелые хирургические вмешательства.

Есть несколько вариантов транспортировки излучения лазера, такие как через шарнирный и через специальное оптическое волокно. Раньше единственным способом доставки лазерного луча был шарнирный, но с развитием технологий появилась возможность использовать специальное оптическое световолокно, которое обеспечивает более удобную и комфортную доставку лазерного излучения в самые труднодоступные места при проведении различных операций.

Еще одной важной характеристикой лазерного оборудования является наличие наборного насадка и манипулов. Комплектность лазерного оборудования показывает, какой спектр и какие процедуры можно выполнить с помощью него. Приобретение дополнительных манипуляционных устройств и насадок для углекислотного лазера представляет собой опциональную возможность, что в свою очередь влечет за собой вариативность стоимости данного оборудования относительно базовой комплектации. Эта характеристика не является напрямую технической, однако ее следует

учитывать при выборе лазерного оборудования для медицинского центра.

Типы активных элементов лазеров. При выборе медицинского лазера не обязательно иметь подробное знание о его внутреннем устройстве, но стоит обратить внимание на основной компонент – активный элемент. Существуют два типа активных элементов для углекислотных лазеров – стеклянные и металлические. Лазеры на основе стеклянных активных элементов обычно стоят дешевле, но их трубки имеют низкий ресурс и не поддаются ремонту. В свою очередь, использование металлических трубок увеличивает стоимость углекислотного лазера, но их срок службы в 4-5 раз выше, а также у них есть другие преимущества в энергетических характеристиках.

1.1.3 Применения углекислотного лазера в медицине

CO₂ лазер имеет значительное преимущество в медицине благодаря своей многофункциональности и может использоваться в различных областях, таких как косметология, хирургия и гинекология. В хирургии его свойства позволяют проводить большинство лазерных операций, таких как удаление новообразований, блефаропластика и разрезы тканей с коагуляцией. В косметологии CO₂ лазер выбирают для проведения процедур шлифовки и абляционного омоложения благодаря простоте использования и скорости проведения процедур. В гинекологии многие производители лазерного оборудования рекомендуют использовать CO₂ лазер для проведения различных гинекологических процедур, таких как лечение вульвовагинальной атрофии, недержания мочи, лабиопластики и других.

Применение лазеров в технических приложениях включает их функции в качестве излучателей и источников энергии. Одним из наиболее распространенных типов лазеров являются устройства, которые используют электрическую энергию для генерации когерентного излучения. Поэтому наличие электропитания представляет собой важный аспект для работы таких лазерных устройств.

Для эффективного функционирования лазерных устройств и обеспечения

качественного излучения, необходимо, чтобы источник питания обеспечивал все требуемые токи и напряжения. Это особенно важно для газовых лазеров, которые требуют инициирования разрядки в газе, помимо обеспечения основной энергии.

Для обеспечения эффективного энергопитания лазерных устройств, минимальный набор структурных элементов включает повышающий трансформатор, выпрямитель и фильтр. Кроме того, требуется также схема инициирования разрядки для генерации когерентного излучения. Эти компоненты обеспечивают необходимые параметры энергии для качественной работы лазерного излучателя.

1.1.4 CO₂ лазер (на углекислом газе)

Работа CO₂-лазера, известного также как лазер на углекислом газе, основывается на «использовании газовой смеси, где усиление света происходит через колебательные переходы молекул CO₂. Для возбуждения молекул CO₂ и релаксации энергии в процессе генерации излучения в CO₂-лазерах используются другие газы, такие как гелий, азот, водород, водяной пар и/или ксенон. Обладая эффективностью более 10%, лазеры, работающие на основной длине волны 10,6 мкм, способны генерировать излучение высокого качества с мощностью в несколько киловатт. Их широкое применение находится в области обработки материалов, таких как резка, сварка и маркировка, а также в лазерной хирургии» [6, с. 6].

Именно благодаря своей высокой мощности и качеству излучения, эти лазеры стали неотъемлемой частью процессов обработки материалов. Например, применение лазеров для резки материалов позволяет производить более точные и аккуратные срезы, а также сокращает количество материала, который теряется в процессе обработки.

В лазерной хирургии эти лазеры также нашли широкое применение, позволяя проводить более точные и безопасные операции. Их использование существенно снижает риск повреждения окружающих тканей, что повышает

эффективность и безопасность хирургических процедур. При работе CO₂-лазера, газовый разряд возбуждает молекулы азота, передавая энергию молекулам CO₂ на более высоких вибрационных уровнях. Чтобы релаксировать нижние уровни и для избежания перегрева применяется гелий. Управление CO₂-лазером может быть выполнено с помощью постоянного тока, переменного тока (например, 20 – 50 кГц) или в области где есть радиочастоты.

1.1.5 Принцип работы лазерных трубок

Внешне лазерная трубка CO₂ напоминает колбу из стекла, которая состоит из нескольких внутренних стеклянных полостей. Всего у лазерной трубки есть три стеклянных контура, при этом газовая смесь располагается только в центральной колыбели, которая также называется газоразрядной трубкой, и во внешней колыбели. Контурное стекло вокруг газоразрядной трубки предназначено для протока охлаждающей жидкости. Кроме того, внутренняя газоразрядная трубка окрашена в бледно-фиолетовый цвет из-за наличия катализатора. Электрод лазерной трубки продемонстрирован на рисунке 3.



Рисунок 3 - Электрод лазерной трубки

На внешней стороне лазерной трубки расположены два контакта -

высоковольтный и низковольтный, которые служат в качестве электродов. Штуцер лазерной CO₂ трубки показан на рисунке 4.



Рисунок 4 - Штуцер лазерной CO₂ трубки

Для подключения труб к блоку розжига необходимы провода, которые могут быть соединены с трубками с помощью штуцеров. Некоторые лазерные трубки CO₂, такие как трубки компании SPT, уже имеют заводскую проводку, впаянную внутри. Над внешней стеклянной колбой лазерной трубки CO₂ находятся два штуцера, которые соединены с внутренним контуром охлаждения, расположенным между внешней колбой и внутренней газоразрядной трубкой. Один штуцер предназначен для входа охлаждающей жидкости, а другой для ее выхода. Вход воды осуществляется через штуцер, расположенный у положительного электрода - анода, а выход - через противоположный конец трубки.

Наконечники для лазерных трубок CO₂ могут быть различных типов. Самые дешевые наконечники сделаны из стекла и приклеены к трубке, что может привести к отслоению наконечника и выходу трубки из строя. Однако, существует множество вариаций металлических наконечников, которые являются более надежным решением. Схема CO₂ трубки представлена на рисунке 5.

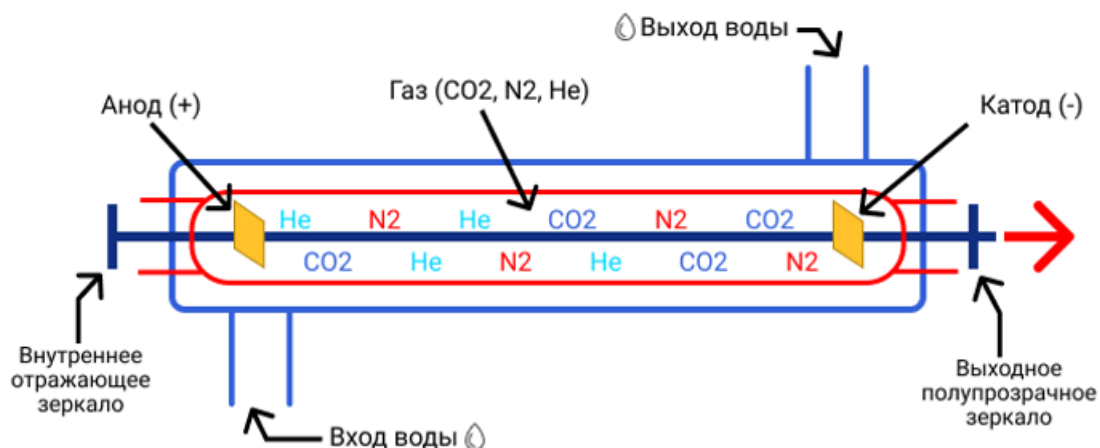


Рисунок 5 - Схема CO₂ трубки

Каждая лазерная трубка CO₂ имеет внутри газ, заполненный на заводе. Однако это не просто CO₂, а специальная газовая смесь, где CO₂ является только одним из компонентов. Обычно большинство производителей использует трехкомпонентную смесь газов, такую как CO₂-N₂-He, где CO₂, N₂ и He являются компонентами. Пропорции смеси каждый производитель лазерных трубок CO₂ подбирает самостоятельно. Однако газовая смесь лазерной трубки CO₂ может также включать в себя дополнительные вещества, такие как ксенон (Xe) или водород (H₂).

1.1.6 Источник питания

Индукционный преобразователь (ИП) является неотъемлемой частью лазера. Для создания лазерной системы необходима источнику питания, имеющая определенные входные, выходные и удельные характеристики, которые в свою очередь напрямую влияют на ее КПД. КПД лазера зависит от КПД источника питания, который определяет эффективность преобразования электрической энергии в когерентное излучение. Следовательно, для оценки КПД лазера необходимо обладать знаниями о КПД источника питания. Ключевыми элементами лазерной системы являются электрические характеристики источника питания, поэтому специалист, работающий с лазерными системами, должен обладать пониманием особенностей источника

питания и уметь оценивать основные параметры источника питания как составную часть лазера.

1.2 Аналоги

Существует несколько аналогов источников питания для лазера с максимальной мощностью излучения 22 Вт, включая следующие модели:

- источник питания HPD-28-22 от компании Coherent Inc. Он обеспечивает выходное напряжение до 28 В и ток до 22 А, что позволяет подавать питание на лазер с максимальной мощностью 22 Вт;

- источник питания LSP-22-28 от компании Lumina Power Inc. Он имеет выходное напряжение до 28 В и ток до 22 А, что также позволяет использовать его для питания лазера с максимальной мощностью излучения 22 Вт;

- источник питания PS-22000-28 от компании Sorensen, который также обеспечивает выходное напряжение до 28 В и ток до 22 А;

- источник питания PSM-30-22 от компании Artesyn Embedded Technologies. Он имеет выходное напряжение до 30 В и ток до 22 А, что позволяет использовать его для питания лазера с максимальной мощностью излучения 22 Вт.

Выбор конкретной модели источника питания зависит от требований к точности и стабильности выходного напряжения и тока, а также от других параметров, таких как размер, вес и стоимость.

В итоге учитывая описанные ранее пункты, можно составить список задач, которые будут включать в себя следующие пункты:

- расчет параметров лазера
- разработка ИП для лазера

2 Основная часть

2.1 Расчет параметров лазера

Лазер характеризуется высокой когерентностью и монохроматичностью своего излучения, тем самым являются результатом технических решений, примененных в излучателе. Однако, стабильность выходной мощности определяется выходными характеристиками ИП для лазера, где флуктуации мощности излучения обусловлены колебаниями разрядного тока.

Во многих случаях, газоразрядные лазеры питаются от электросети переменного тока. Оптимальная работа газоразрядных лазеров напрямую зависит от эффективности преобразования переменного тока в постоянный ток, что может приводить к изменению уровня пульсаций выходного напряжения и, как следствие, влиять на массогабаритные, энергетические и экономические показатели источника питания лазера, следовательно для решение данной проблемы необходимо определить максимальный уровень изменений частоты или амплитуды выходного излучения лазера, при котором работа лазерной системы является приемлемой. для лазера, а так же проверить соответствия с требованиями стабильности выходной мощности от его области применения.

Во время разработки ИП лазера, используемых в практике, в качестве исходных данных определяются мощность излучения и требования к ее стабильности. Одним из ключевых параметров является ватт-амперная характеристика (ВтАХ), которая определяет зависимость выходной мощности лазера от тока разряда.

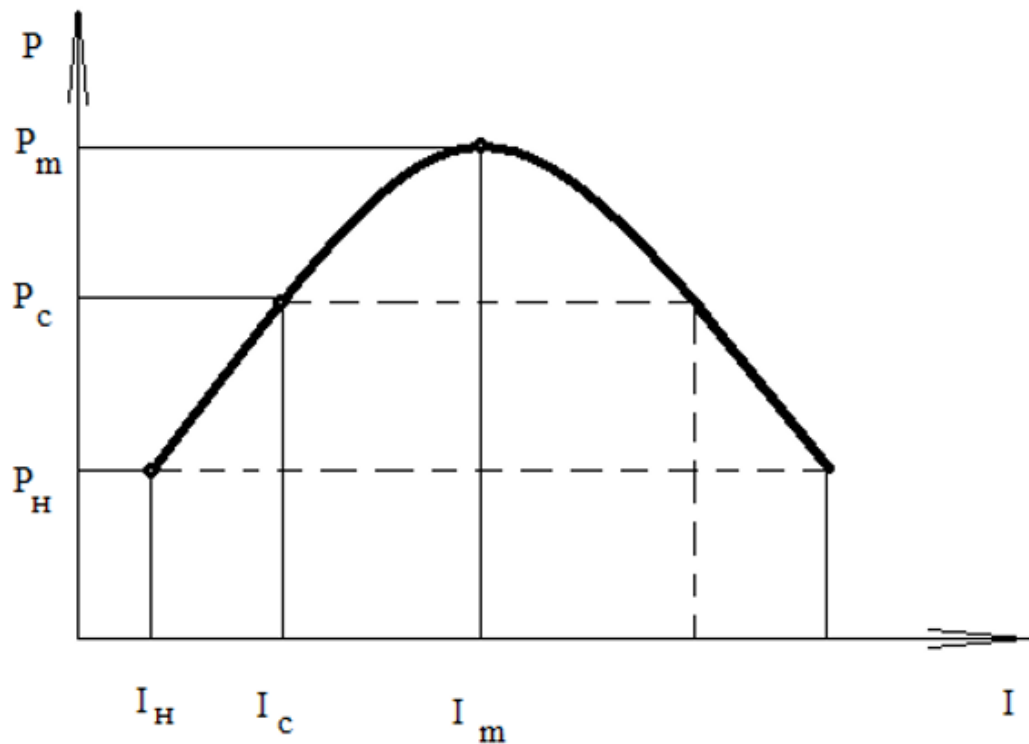


Рисунок 6 – Ватт-амперная характеристика

Несмотря на это, у многих газоразрядных лазеров ВтАХ имеет немонотонный характер, и мощность излучения достигает максимального значения при определенных значениях тока. (Рисунок 6.).

2.1.1 Вычисление требуемой выходной мощности излучения

Для достижения максимальной выходной мощности на максимальном режиме CO₂ лазер должен находиться в рабочей точке.

Из-за этого ватт-амперная характеристика CO₂ лазеров имеет часто экстремальную форму, которую можно аппроксимировать определенным типом многочлена:

$$P = a \cdot I^2 + b \cdot I + c \quad (1)$$

«где a , b , c - постоянные коэффициенты, их следует рассчитывать по заданным точкам ($P_{max_{max}}$) и ($P_{min_{min}}$);

Средняя мощность излучателя:» [1, с. 7]

P – мощность.

$$P_c = P_{max} \quad (2)$$

P_c - средняя мощность;

P_{max} -- максимальная мощность.

2.1.2 Расчет ватт-амперной характеристики

Из расчетов выше мы узнали значение средней мощности излучения, следовательно теперь можем вычислить коэффициенты ВТАХ a , b , c , для этого нам необходимо решить систему уравнений.

$$\begin{cases} P_{max} = a \cdot I_{max}^2 + b \cdot I_{max} + c \\ P_{min} = a \cdot I_{min}^2 + b \cdot I_{min} + c \\ 2 \cdot a \cdot I_{max} + b = 0 \end{cases} \quad (3)$$

P_{max} – максимальная мощность;

P_{min} – минимальная мощность;

I_{min} – минимальная сила тока;

a , b , c - постоянные коэффициенты.

Затем приступаем к решению уравнений, так как знаем значения параметров. Используя программу MathCAD мы можем видеть следующие значения:

$$\begin{cases} a = -9,9151 \cdot 10^3 \text{Вт}/\text{А}^2 \\ b = 991,51 \text{Вт}/\text{А} \\ c = -2,788 \text{Вт} \end{cases}$$

a , b , c - постоянные коэффициенты.

Применяя математическую модель, заданную выражением (1) для ВТАХ, возможно произвести расчеты, направленные на определение

максимально допустимых отклонений тока излучателя.

2.1.3 Расчет выдаваемой мощности излучения (пульсации)

Зная максимальную мощность P_{max} , можем найти мощность изменения частоты или амплитуды в сигнале на выходе:

$$\begin{cases} P_0 = P_{max} \\ P_1 = P_2 = P_0 \left[1 - \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \right] = 22[1 - 0,2] = 17,6 \text{ Вт} \end{cases} \quad (4)$$

«где $\frac{\Delta P}{P_0}$ - это разрешенные пульсации мощности излучения лазера» [12, с; 7];

P_{max} – максимальная мощность.

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 20\% = 0,2$$

2.1.4 Вычисление значения электрического тока (величины пульсаций)

«В результате решения уравнения:

$$\begin{aligned} P &= a \cdot I^2 + b \cdot I + c \\ -9,9151 \cdot 10^3 \cdot I^2 + 991,5099 \cdot I - 2,7878 &= 17,6 \end{aligned}$$

P - мощность;

a, b, c - постоянные коэффициенты;

I - сила тока.

Откуда:» [14, с. 8]

$$\begin{cases} I_1 = 71,0657 \text{ мА} \\ I_2 = 28,9346 \text{ мА} \end{cases}$$

Учитывая приближенный характер уравнения (2), описывающего Вольт-

Амперную Характеристику (ВтАХ), необходимо принять во внимание два аспекта. Во-первых, данное уравнение не дает полной характеристики ВтАХ. Во-вторых, даже если считать, что данное уравнение подходит для описания ВтАХ при больших значениях тока, высокий газоразрядный ток соответствует высокой тепловой мощности на лазерной трубке.

С учетом указанных факторов особенно важным становится определение ВтАХ для выбора электрической рабочей точки источника излучения, а также необходимо учесть процесс преобразования электрических токов в мощность излучения в излучателе и обратный процесс, при котором мощность излучения преобразуется обратно в электрический ток.

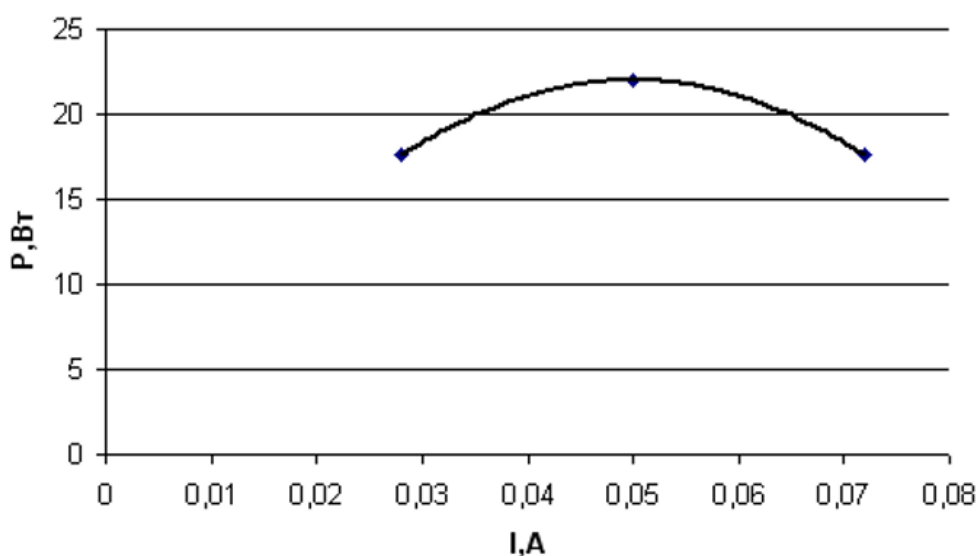


Рисунок 7 – ВтАХ

Для проверки результатов понадобится программа Excel, которая позволит построить ВтАХ и оценить соответствие между теоретической и практической характеристиками излучателя. (Рисунок 7).

2.1.5 Свойства электрического напряжения, которые связаны с его изменениями или колебаниями

Чтобы рассчитать свойства электрического напряжения на лазерной трубке U_0 и для того чтобы найти максимальный интервал измерения U_1, U_2 , который имеет ограничения пульсациями, будем использовать вольт-

амперная характеристику (ВАХ). Но не будем забывать, что для излучателей углекислотных газоразрядных трубок, отпаянных в рабочем режиме, характерна падающая ВАХ, которая в свое время применяется для определения динамического электрического сопротивления r_g . (Рисунок 8.).

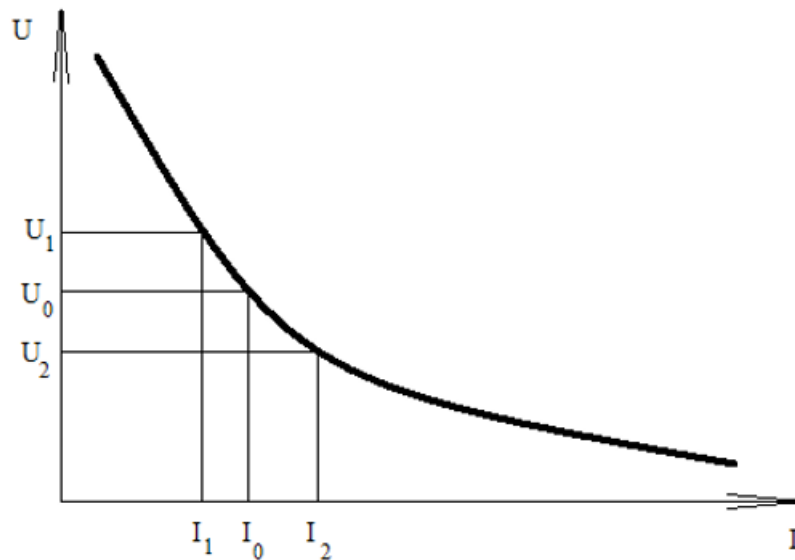


Рисунок 8 - Диаграмма напряжений (Ватт-амперная характеристика на CO2 трубке)

Представленное уравнение является самым простым способом для определения аппроксимации вольт-амперной характеристики CO2 трубок:

$$U = k_1 + \frac{k_2}{I} \quad (5)$$

U - напряжение;
 k_1, k_2 - коэффициенты.

«В представленном уравнении выше, где U, I обозначают, соответственно, напряжение и ток на трубке, коэффициенты k_1 и k_2 являются постоянными, их можно найти на основе экспериментальных данных или заранее заданных значений $U(I)$ » [16, с. 9].

Чтобы определить k_1 и k_2 можно подставить все значения в формулу (5) и используя (I_n, U_n) и (I_k, U_k) решить его. Таким образом выйдет следующее:

$$W \begin{cases} U_{Pmin} = k_1 + \frac{k_2}{I_{min}} \\ U_{Imin} = k_1 + \frac{k_2}{I_p} \end{cases} \quad (6)$$

k_1, k_2 - коэффициенты;

U_{Pmin} - минимальное напряжение;

U_{Imin} - максимальное напряжение;

I_{min} – минимальная сила тока;

I_p -максимальная сила тока.

$$\begin{cases} 13,9 \cdot 10^3 = k_1 + \frac{k_2}{5,2 \cdot 10^{-3}} \\ 12 \cdot 10^3 = k_1 + \frac{k_2}{62 \cdot 10^{-3}} \end{cases}$$

Далее получим:

$$k_1 = 11,826кВ$$

$$k_2 = 1,9В/А$$

Аналогично расчету токов с использованием Вт-амперной характеристики (2), расчет порядка 1 с использованием вольт-амперной характеристики (5) осуществляется. Для определения пульсаций напряжения необходимо сначала рассчитать коэффициенты с помощью уравнения (5), используя начальные и конечные точки ВАХ. Затем, I_0, I_1, I_2 трижды вычисляем известные токи с использованием подсчитанных k_1 и k_2 :

$$U_0 = k_1 + \frac{k_2}{I_0} = 11,826 \cdot 10^3 + \frac{10,7845}{50 \cdot 10^{-3}} = 12,0417кВ$$

$$U_1 = k_1 + \frac{k_2}{I_1} = 11,826 \cdot 10^3 + \frac{10,7845}{71,0657 \cdot 10^{-3}} = 11,9778кВ$$

$$U_2 = k_1 + \frac{k_2}{I_2} = 11,826 \cdot 10^3 + \frac{10,7845}{28,9346 \cdot 10^{-3}} = 12,1987кВ$$

Имея все посчитанные результаты, строим вольт-амперную характеристику (ВАХ) (Рисунок 9).

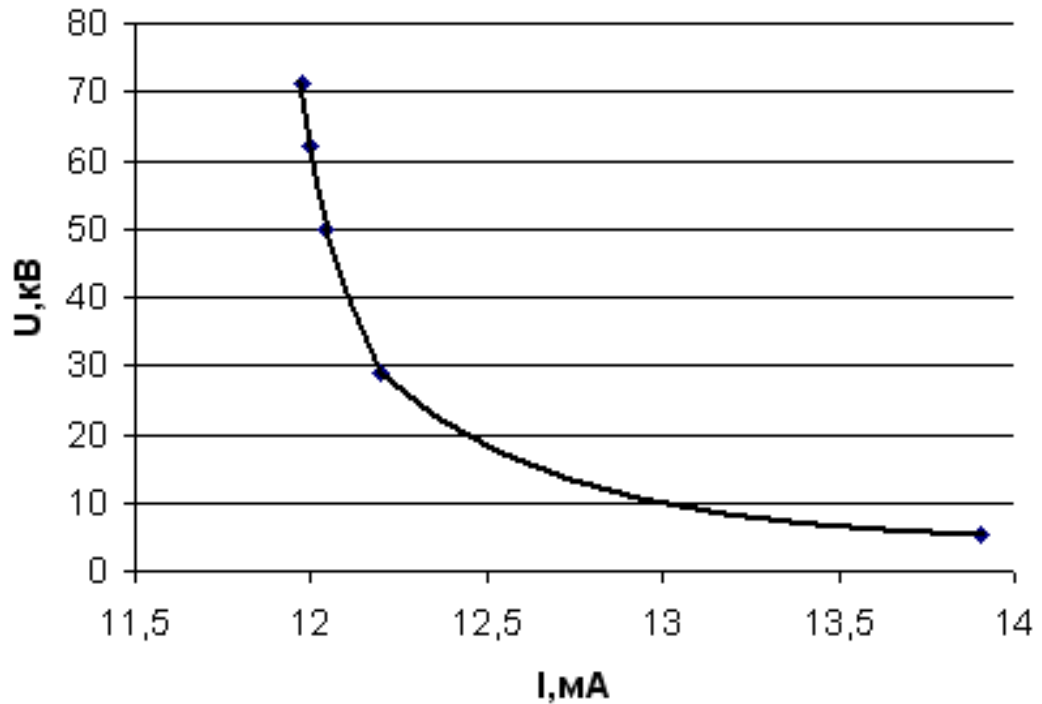


Рисунок 9 – ВАХ

Таким образом мы видим вольт-амперную характеристику в графическом виде.

2.1.6 Характеристики динамического сопротивления

«Вычисление динамического сопротивления r_d может быть выполнено путем определения производной функции по току dU/dI . В случае, если вольт-амперная характеристика задана аналитическим способом в форме (5), то можем решить следующее уравнение» [20, с. 10]:

$$r_d = \frac{dU}{dI} = -\frac{k_2}{I^2} \quad (7)$$

r_d - динамическое сопротивление;

$\frac{dU}{dI}$ - производная функция по току;

k_2 – коэффициент;

I – сила тока.

В случае, если ВАХ имеет падающий характер, можно сделать вывод случае неустойчивости разряда в газовой плазме возможна его стабилизация с помощью компьютерных возможностей или решение схем с источников питания.

Для описания зависимости динамического сопротивления от тока и параметров вольт-амперной характеристики используется выражение (6), где коэффициент k_2 всегда положительный, а значит, динамическое электрическое сопротивление $r_d < 0$ в любой точке ВАХ отрицательно и увеличивается с уменьшением тока. Максимальное значение r_d достигается при минимальном токе I_2 в режиме максимальной мощности.

$$r_d = -\frac{10,7845}{(28,9346 \cdot 10^{-3})^2} = -12,8815 \text{кОм}$$

2.1.7 Расчет электрической мощности (полезной)

Выражаясь научным языком, излучатель в газоразрядной трубке представляет собой нагрузку для источника питания. Это означает, что передаваемая от источника питания в излучатель электрическая мощность является конечным энергетическим результатом работы источника питания. В свою очередь, полезная мощность $P_{эл}$, которую поставляет источник питания в излучатель, является важным параметром для расчета коэффициента полезного действия (КПД) источника питания.

Имея известные значения тока в среднем рабочем состоянии I_0 газоразрядной трубки и напряжение в таком же состоянии соответственно U_0 на ней, можно рассчитать КПД по закону Джоуля-Ленца, учитывающему эффект электромагнитной индукции. Таким образом, вычисление полезной мощности позволяет определить энергетический результат работы источника питания и использовать эту величину для оценки КПД данного источника:

$$P_{эн} = U_0 \cdot I_0 \quad (8)$$

$$P_{эн} = 12,0417 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 602,085 \text{ Вт}$$

$P_{эн}$ - полезная мощность;

U_0 - напряжение в средней рабочей мощности;

I_0 - ток в средней рабочей мощности.

2.1.8 КПД

Используя передаваемую в излучатель полезную мощность ИП для накачки активной среды лазера, происходят затраты энергии в излучателе. Только мощность излучения может быть использована как полезная мощность в лазере.

Для подсчета КПД, была составлена формула и решена:

$$\eta_{из} = \frac{P_0}{P_{эн}} \quad (9)$$

$\eta_{из}$ - КПД

P_0 - средняя мощность

$P_{эн}$ - полезная мощность

$$\eta_{из} = \frac{22}{602,085} = 0,0365$$

Все полученные данные запишем в таблицу 1.

Таблица 1 - Суммарный обзор параметров излучателя, связанных с электричеством.

Коэффициенты аналитически заданной ВТАХ	$a, \text{Vm}/\text{A}^2$	$b, \text{Vm}/\text{A}$	c, Vm
	$-9,9151 \cdot 10^3$	991,5099	-2,7878
Коэффициенты аналитически заданной ВАХ	K_1, B		$K_2, \text{B}/\text{A}$
	$11,826 \cdot 10^3$		1,900
Рабочий ток излучателя I_0, mA			50
Рабочее напряжение излучателя U_0, kV			12,04
Наименьшее значение тока излучателя, обусловленное пульсациями I_1, mA			28,94
Наибольшее значение напряжения излучателя, обусловленное пульсациями U_1, kV			12,20
Наибольшее значение тока излучателя, обусловленное пульсациями I_2, mA			71,07
Наименьшее значение напряжения излучателя, обусловленное пульсациями U_2, kV			11,98
Динамическое сопротивление излучателя r_g, kOm			-12,88
Полезная электрическая мощность ИП, $P_{ЭП}, \text{Вт}$			602,09
КПД излучателя, $\eta_{из}$			0,0365

Таким образом мы получаем таблицу параметров излучателя, далее можно переходить к разработке ИП для лазера.

2.2 Разработка ИП для лазера

2.2.1 Структурное описание ИП для лазера

Обеспечение правильного функционирования излучателя невозможно без неотъемлемого компонента работы. Для обеспечения требуемых напряжений и токов в лазерных системах, необходим источник питания, который является ответственным за данную задачу.

Особенно актуально это в случае небольших непрерывных газовых излучателей, для которых требуется высокое напряжение и низкие токи с определенной пульсацией. Обеспечение энергии для работы лазерного излучателя требует источника первичной электрической энергии, который

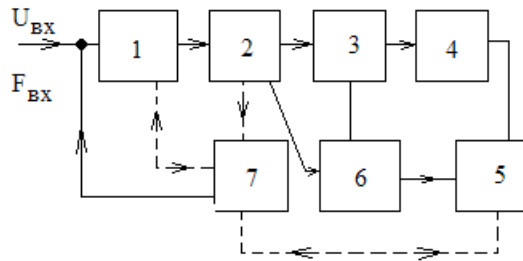
поставляет переменный ток 220 В, 200 Гц. Для преобразования входного напряжения в выходное используется электромагнитный трансформатор. Однако для обеспечения стабильного тока разряда необходим высоковольтный выпрямитель, который является важным элементом структурной и принципиальной схемы источника питания.

«Выходное напряжение на активной нагрузке однофазного выпрямителя меняется от нуля до амплитудного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора, поэтому для обеспечения нужного уровня пульсаций необходим фильтр, который подключается к выходу выпрямителя.

Для создания источника питания (ИП) для излучателя необходимо использование элементарной схемы, включающей в себя повышающий трансформатор, выпрямитель и фильтр, которые являются неотъемлемыми компонентами структуры источника питания. Важной задачей является соединение излучателя с фильтром, которое выполняется через балластный резистор, обеспечивающий стабилизацию газоразрядных процессов и снижение пульсаций в электрической цепи» [21, с. 13]. Перед включением прибора проводимость газоразрядного прибора остается низкой, и для зажигания разряда необходимо подать иницирующий сигнал, вызывающий ионизацию газа и увеличение проводимости. Схема зажигания должна быть включена в источник питания, а питание ее наиболее эффективно осуществляется от высоковольтного выпрямителя и фильтра, как представлено на структурной схеме источника питания. (рисунок 9).

Для достижения необходимой эффективности системы человек-машина, необходимо включать в структуру источника питания (ИП) информационные, управляющие и защитные элементы, которые гарантируют его правильную работу. Перечислены различные элементы, которые могут использоваться для отображения информации о работе источника питания (ИП) оператору. «Среди этих элементов присутствуют измерительные приборы с указателями, световые табло, панели, сигнальные

лампы и светодиоды, а также мнемонические схемы и пиктограммы» [22, с.13]. Все они служат для того, чтобы оператор мог получить нужную информацию о работе ИП, которая в свою очередь может быть критически важной для успешного выполнения задач, связанных с данным устройством.



1 - повышающий трансформатор; 2 - выпрямитель;
3 - фильтр; 4 - балластный резистор; 5 - излучатель;
6 - схема зажигания; 7 - элементы информационные,
управления и защиты.

Рисунок 10 – Структура источника питания

Поэтому можно заключить, что структурная модель нестабилизированного источника питания для лазера представлена на рисунке 10.

2.2.2 Функциональная модель ИП для лазера

После построения структурной модели ИП, переходим к схеме «функциональной модели» [18, с. 14] источника питания для лазера, которая расположена на рисунке 11 и показывает «силовую часть с мостовой схемой выпрямителя» [17, с. 14].

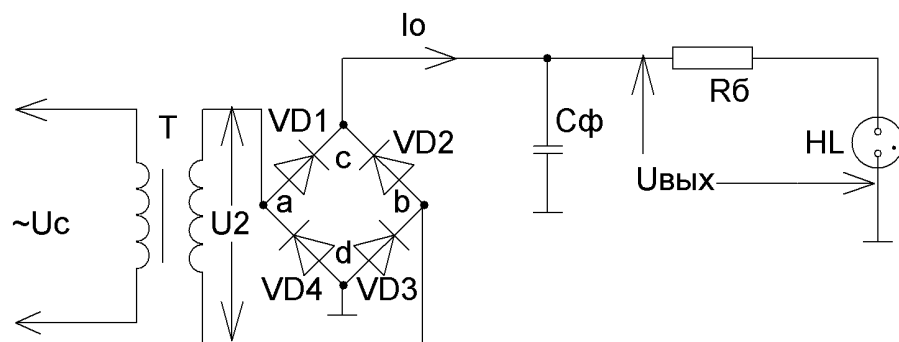


Рисунок 11 - Модель функционирования

Модель функционирования продемонстрирована на рисунке 11.

2.2.3 Защитная цепь

Применение балластного резистора R_{δ} в цепи газового разряда хорошо помогает в устойчивости данного процесса. При повышении значения сопротивления R_{δ} , улучшение стабильности тока разряда достигается путем применения указанного резистора, однако такое решение ведет к нежелательному снижению КПД источника питания. Чтобы обеспечить требуемую стабильность газового разряда, необходимо тщательно подобрать оптимальное значение сопротивления балластного резистора.

$$R_{\delta} = 1,2 \cdot |r_{\delta}| \quad (10)$$

R_{δ} - сопротивление балластного резистора;

r_{δ} - сопротивление резистора.

$$R_{\delta} = 1,2 \cdot |-12,8815 \cdot 10^3| = 15,4578 \text{кОм}$$

При выборе значения сопротивления балластного резистора рекомендуется осуществлять округление в большую сторону до ближайшего номинального значения сопротивления E24, что позволяет учитывать установленные стандарты и требования к точности измерения. Благодаря данному действию можно осуществить выбор оптимального значения с учетом указанных факторов.

$$R_{\delta} = 16 \text{кОм}$$

Чтобы нам рассчитать мощность которая необходима для рассеяния следует прибегнуть к закону Джоуля-Ленца:

$$P_p = I_0^2 \cdot R_{\delta} \quad (11)$$

P_p - полезная мощность;

I_0 - среднее значение силы тока;

R_6 - сопротивление балластного резистора.

$$P_p = (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 15,4578 \cdot 10^3 = 38,6445 \text{ Вт}$$

« $P_p(R_6) = 40 \text{ Вт}$ в ряду E24.» [11, с. 15]

Для обеспечения соответствия заданным «требованиям рекомендуется использовать резистор ПЭВ, характеристики которого включают в себя номинальное сопротивление 16 кОма, рассеиваемую мощность 40 Вт и предельное рабочее напряжение 1,4 кВ, а также габаритные размеры» [11, с. 15], которые следует учитывать при выборе компонента для конкретного применения резистора таковы: высота (H) - 35 мм, диаметр (D) - 21 мм, длина (L) - 87 мм, диаметр выводов (d) - 12 мм, а его масса не превышает 98 граммов. (Рисунок 12)

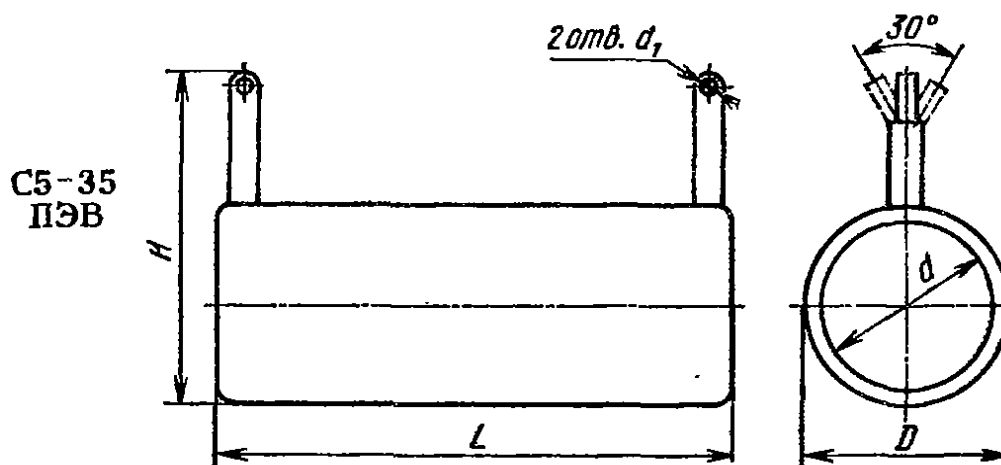


Рисунок 12 – Резистор ТВО – 60

«При анализе пульсаций напряжения следует учитывать, что балластный резистор является последовательно подключенным элементом цепи излучателя. Вследствие этого, любые изменения тока излучателя приведут к соответствующим изменениям напряжения на балластном резисторе. Если ток излучателя достигает минимального значения, то напряжение на балластном резисторе будет максимальным в связи с падением

напряжения на вольт-амперной характеристике. В случае, если ток излучателя максимален, напротив, напряжение на балластном резисторе будет минимальным. Исходя из вышеизложенного, минимальное падение напряжения на балластном резисторе, вызванное пульсациями, может быть определено с помощью следующей формулы:

$$U_{R2} = I_2 \cdot R + U_2(I_2) = 28,9346 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^3 + 12,1987 \cdot 10^3 = 12,662 \text{кВ}$$

соответственно максимальное»[8, с. 16]:

$$U_{R1} = I_1 \cdot R + U_1(I_1) = 71,0657 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^3 + 11,9778 \cdot 10^3 = 13,115 \text{кВ}$$

2.2.4 Определение фильтра (сглаживающего)

«С целью уменьшения пульсации выпрямленного напряжения на излучателе используется сглаживающий фильтр в источнике питания. Его основная функция заключается в поддержании уровня пульсаций напряжения на излучателе в заданных пределах. Емкостной фильтр, состоящий из конденсатора, соединенного параллельно нагрузке и выходным зажимам выпрямителя, является простой формой сглаживающего фильтра. Для достижения лучших результатов могут использоваться несколько конденсаторов, которые могут быть последовательно и/или параллельно соединены. Формально, емкость конденсатора фильтра определяется по следующей формуле» [7, с. 16]:

$$C_{\phi 1} = C_{\phi 2} \geq \frac{I_0}{f_n \cdot \Delta U_n} = \frac{0,050}{100 \cdot 453} = 1,104 \cdot 10^{-6} \text{Ф}$$

«где f_n - частота изменения сетевого напряжения» [6, с. 16]

«Чтобы определить $U_{ном}$, воспользуемся равенством ниже» [5, с. 16]:

$$U_{ном} = U_{R1} = 13,115 \text{кВ}$$

Из Е24 $U_{ном} = 16 \text{кВ}$

При необходимости соответствия определенным требованиям были выбраны два конденсатора К75-15 показанный на рисунке 13, обладающие высоким уровнем напряжения. Характеристики первого из них включают в себя номинальную емкость, достигающую 1 микрофарад, номинальное напряжение, равное 16 кВ, а также максимальную массу, не превышающую 13 000 г, а также физические размеры, где А равно 90 мм, L равно 150 мм, В равно 130 мм, Н равно 310 мм, и h равно 62 мм.

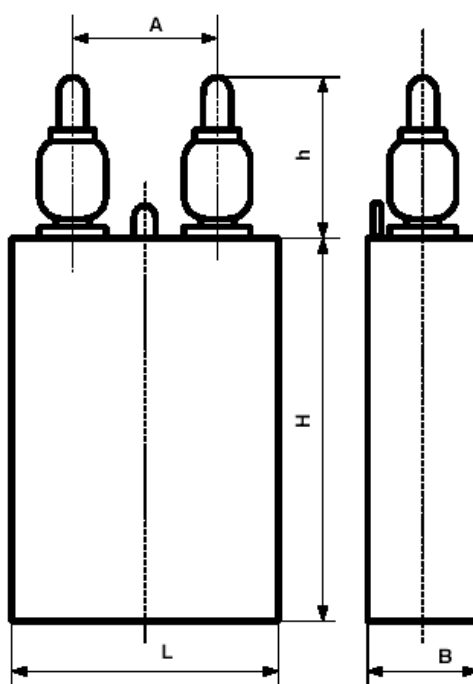


Рисунок 13 - Конденсатор К75-15.

Второй конденсатор, в свою очередь, обладает номинальной емкостью 10,25 микрофарад, номинальным напряжением 16 кВ, максимальной массой не более 3000 г, и размерами $A=40$ мм, $L=85$ мм, $B=120$ мм, $H=140$ мм, и $h=62$ мм.

2.2.5 Расчет схемы мостового выпрямителя

Применение полупроводниковых диодов или диодных сборок на сегодняшний день является распространенным при трансформации

переменного тока в пульсирующий ток в выпрямителях. Среди основных параметров, определяющих работу выпрямительных диодов, можно выделить максимально допустимое постоянное напряжение прямого тока. Данные диоды представляют собой электронные компоненты, которые используются в целях преобразования тока. Следующий параметр - среднее значение импульсного тока, при любой форме импульса. Оба этих параметра играют важную роль в эффективной работе выпрямительных диодов.

Применение полупроводниковых диодов в выпрямительных схемах обеспечивает более эффективное преобразование переменного тока в пульсирующий ток. В результате, возможна более эффективная работа электронных устройств, использующих данный тип электронных компонентов

$$I_{\text{пр.макс}} > \frac{I_0}{2} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2} = 25 \text{ мА}.$$

$I_{\text{пр.макс}}$ - максимальное значение силы тока;

I_0 - среднее значение силы тока.

«напряжение, присутствующее на диоде» [4, с. 17]

$$U_{\text{вых}} < U_{\text{обрмакс}}$$

$U_{\text{вых}}$ - значение напряжения выхода;

$U_{\text{обрмакс}}$ - значение обратного максимального напряжения.

$$U_{\text{вых}} \approx 12,1987 \text{ кВ}$$

Диодный столб КЦ201Е соответствует требуемым параметрам, установленным для данного устройства. Данный столб характеризуется несколькими параметрами, которые важны для эффективной работы устройства.

Один из этих параметров - максимальный прямой ток, который может протекать через данный столб, составляет 500 мА. Это значение является критическим для эффективной работы устройства, так как он определяет максимально допустимый ток, который может проходить через столб без его повреждения.

Другой важный параметр диодного столба КЦ201Е показанного на рисунке 14 - напряжение обратной связи $U_{обр}$, которое равно 15000 кВ. Данное значение указывает на максимально допустимое обратное напряжение, при котором данный столб может работать без повреждений.

Кроме того, стоит отметить, что масса данного столба составляет 90 граммов. Это значение также является важным, так как определяет физические характеристики устройства и его установку в системе.

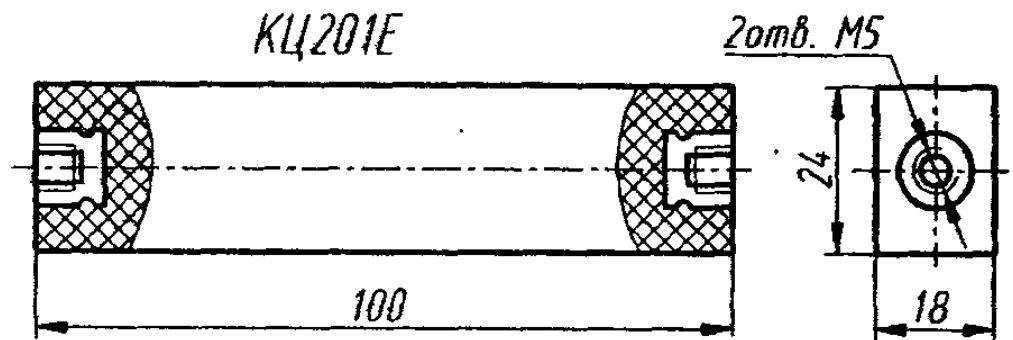


Рисунок 14 - КЦ201Е

На рисунке 14 мы видим схему диодного столба КЦ201Е.

2.2.6 Определение параметров трансформатора(силового)

«Реализация силовых трансформаторов базируется на принципе электромагнитной индукции, который предусматривает наличие в устройстве нескольких индуктивно связанных обмоток. Использование трансформаторов обусловлено необходимостью преобразования напряжения электросети в соответствии с требуемыми параметрами для питания различных источников электропитания. Один из ключевых элементов трансформатора - это магнитопровод, который состоит из отдельных медных

или алюминиевых проводов, применяемых для создания обмоток. Существует несколько конструктивных вариантов трансформаторов, включая броневые, стрежневые и тороидальные (кольцевые) конструкции.

Используя букву "Ш" в качестве магнитопровода, броневые трансформаторы имеют особенность расположения всех обмоток на среднем стрежне и бронируют их для обеспечения защиты от внешних воздействий. В этих трансформаторах магнитный поток разветвляется на правую и левую части, что приводит к уменьшению сечения крайних стержней вдвое по сравнению с средним. При выборе типа магнитопровода рекомендуется отдавать предпочтение броневым трансформаторам, так как они обладают широкой номенклатурой серийно выпускаемых магнитопроводов, которые могут использоваться для проектирования источников питания различной мощности. Для диапазона частот переменного напряжения от десятков герц до единиц килогерц, используются электротехнические стали в виде пластин или лент.

Для расчета силового трансформатора необходимо сначала определить вторичную мощность, которая соответствует мощности, потребляемой излучателем. Этот шаг является первоочередным при расчете силового трансформатора и позволяет определить необходимое значение первичной мощности для обеспечения требуемой вторичной мощности» [19, с. 18].

$$P_2 = P_{2из} + P_{2ин} \quad (12)$$

P_2 - значение вторичной мощности;

$P_{2из}$ - значение излучателя;

$P_{2ин}$ - значение инвертора.

«Поскольку информационной частью является неоновая лампа, вторичная мощность отсутствует и равна» [15, с. 19]:

$$P_2 = P_{2из} = U_2 \cdot I_2 = (U_0 + R_0 \cdot I_{cp}) \cdot I_2 =$$

$$= (12,0417 \cdot 10^3 + 15,4578 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}) \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 640,73 \text{ Вт}$$

«Необходимо определить первичную мощность трансформатора» [10, с. 19],

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{640,73}{0,85} = 753,799 \text{ Вт}$$

$\eta = 85\%$ - «КПД трансформатора» [13, с. 19]

«Определяем поперечное сечение сердечника трансформатора, который является типом броневое» [9, с. 19]:

$$Q_c = 8 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{f}} = 8 \cdot \sqrt{\frac{753,799}{50}} \cdot 10^2 = 3106,225 \text{ мм}^2 = 31,062 \text{ см}^2$$

«Для выбора подходящего поперечного сечения сердечника из унифицированного ряда магнитопроводов типа Ш» [16, с. 19] необходимо учитывать определенное неравенство, которое связано с площадью сечения стали и площадью окна магнитопровода. Это неравенство предполагает, что произведение этих площадей должно быть не менее определенного значения. С учетом данного критерия, наиболее подходящим магнитопроводом типа Ш из унифицированного ряда магнитопроводов является магнитопровод Ш40х100, который показан на рисунке 15. Этот магнитопровод обладает площадью окна магнитопровода в 40 кв.см, площадью сечения стали, умноженной на площадь окна, равной 1600 кв.см⁴, средней длиной проводника в 34,3 м, активным объемом магнитопровода в 1370 куб.см, конструктивной постоянной в 1,3599 кв.см² и ориентировочной массой в 9860 г. Все вышеупомянутые характеристики соответствуют условиям неравенства, необходимым для выбора сердечника магнитопровода.

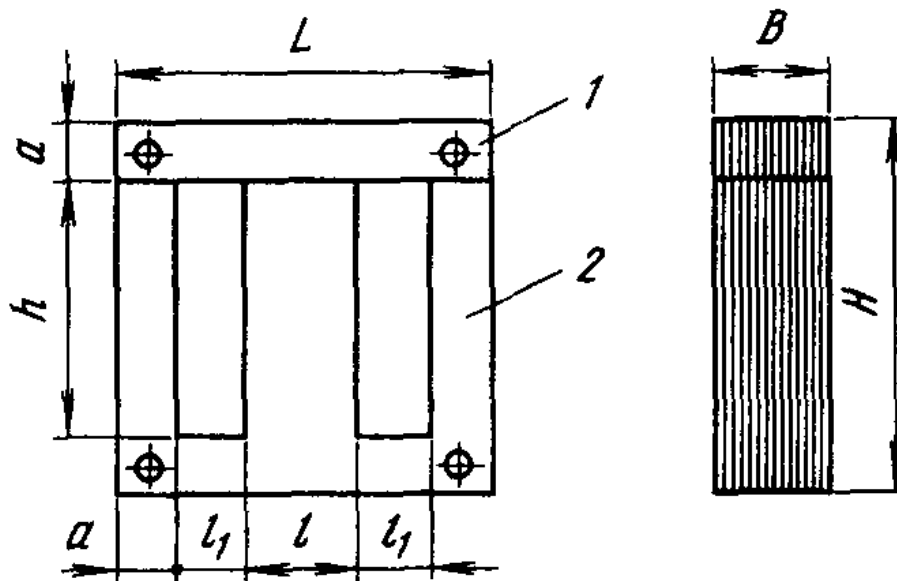


Рисунок 15 - Ш 40x100

«Для определения числа витков первичной обмотки мы используем размеры магнитопровода: $a=20\text{мм}$; $h=100\text{мм}$; $l=40\text{мм}$; $l_1=40\text{мм}$; $L=160\text{мм}$; $B=100\text{мм}$; $H=140\text{мм}$.» [11, с. 20]

$$\omega_1 = \frac{U_1 \cdot 10^6}{4,44 f Q_{cm} B'} \quad (13)$$

ω_1 - число витков;

U – напряжение;

Q_{cm} – заряд.

«Принимая значение B в данном случае равным 1 Тл, что соответствует индукции насыщения магнитопровода, можно использовать инженерную формулу для расчета. При этом, для подстановки значений входящих переменных в формулу, необходимо учитывать определенные единицы измерения ω_1 » [17, с. 20].

$$[Q_{cm}] = 1\text{мм}^2; [U_1] = 1\text{В}; [f] = 1\text{Гц}; [B] = 1\text{Тл}.$$

Q_{cm} - значение заряда;

U_1 - значение напряжения;

f - значение индуктивности.

Чтобы убрать все потери все результаты умножаем на 10%:

$$\omega_1 = 1,1 \cdot \frac{220 \cdot 10^6}{4,44 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 10^2} = 273 \text{ витка.}$$

Далее нам нужно определить количество витков которое будет на вторичной обмотке:

$$\omega_2' = 1,1 \cdot \omega_1 \frac{U_2}{U_1} = 1,1 \cdot 273 \cdot \frac{12,815 \cdot 10^3}{220} = 15874 \text{ витков;}$$

$$\omega_2 = 1,1 \omega_2' = 1,1 \cdot 7588 = 8347 \leftrightarrow \leftrightarrow \text{ витка;}$$

Считаем ток который будет на обмотке первичной:

$$I_1 = P_1 / U_1 = \frac{753}{220} = 3,424 \text{ A.}$$

I_1 - значение силы тока;

P_1 – значение мощности;

U_1 – значение напряжения.

Затем нам нужно найти сечение и диаметр которые будут присутствовать на первичной обмотке, для этого нам нужно принять во внимание, что плотность тока будет равна $j = 2,5 \text{ A/мм}^2$:

$$S_1' = I_1 / j = \frac{3,424}{2,5} = 1,37 \text{ мм}^2$$

S_1' - значение сечения;

I_1 - значение силы тока;

j - значение плотности.

«С целью создания обмоток трансформаторов применяют провода,

которые имеют круглое или прямоугольное сечение и изготавливаются из меди с изоляционным покрытием, либо из медной или алюминиевой фольги. При выборе провода для вторичной обмотки необходимо учитывать требования к току и напряжению. Среди подходящих проводов может быть использован ПЭВ-1, который обладает следующими параметрами: номинальный диаметр медного провода - 1,4 мм, сечение медного провода - 1,5394 мм², диаметр провода с изоляцией - 1,48 мм, а также сопротивление 1 м провода при температуре 20°C, равное 0,0113 Ом» [14, с. 20].

$$I_2 = P_2/U_2 = \frac{640,73}{12,815 \cdot 10^3} = 49,998 \cdot 10^{-3} A$$

U_2 - значение напряжения;

I_1 - значение силы тока;

j - значение плотности.

$$S'_2 = I_2/j = \frac{49,998 \cdot 10^{-3}}{2,5} = 0,02_{мм^2}$$

S'_1 - значение сечения;

I_1 - значение силы тока;

j - значение плотности.

«Выбираем обмоточный провод ПЭВ-1 из [15, с. 14], который имеет следующие характеристики: номинальный диаметр провода по меди 0,16 мм, сечение провода по меди 1,5394 мм², диаметр провода с изоляцией 0,187 мм и сопротивление 1 м провода при 20°C 0,873 Ом.» [24, с. 20]

$$S_{2uz} = \frac{\pi \cdot d_{2uz}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,105^2}{4} = 0,0087_{мм^2}$$

S_{2uz} - значение обмотки провода;

d_{2uz} значение диаметра.

Вычислив все значения сверху определяем $S_{\text{сеч}}$

$$\begin{aligned} S &= S_{1\text{из}} \cdot \omega_1 + S_{2\text{из}} \cdot \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_{1\text{из}}^2}{4} \cdot \omega_1 + \frac{\pi \cdot d_{2\text{из}}^2}{4} \cdot \omega_2 = \\ &= \frac{\pi \cdot 1,48^2}{4} \cdot 273 + \frac{\pi \cdot 0187^2}{4} \cdot 15874 = 905,6246 \text{мм}^2 \end{aligned}$$

S - значение сечения провода;

$d_{1\text{из}}$ значение диаметра 1;

$d_{2\text{из}}$ значение диаметра 2.

Одним из ключевых аспектов проектирования трансформатора является подбор соответствующего отношения площади проводника к площади окна магнитопровода. Данное соотношение определяет коэффициент заполнения окна магнитопровода и должно удовлетворять заданному неравенству, что является необходимым условием для эффективной работы трансформатора. Для этого необходимо вычислить занятую площадь проводника и сравнить ее с площадью окна магнитопровода. Если полученное отношение меньше заданного коэффициента заполнения, то необходимо выбрать проводник большего сечения или увеличить количество витков обмоток. В противном случае, при использовании проводника меньшего сечения или уменьшении количества витков обмоток, возможно нарушение заданных параметров трансформатора ($K_{\text{ок}}$).

$$K_{\text{ок}} = \frac{S}{S_{\text{ок}}} \leq 0,3 \quad (14)$$

$K_{\text{ок}}$ - количество витков обмотки;

S – значение сечения;

$S_{\text{ок}}$ - витки сечения

Если все сходится с данным значением $K_{\text{ок}} < 0,3$, то можно успешно

переходить к дальнейшим расчетам.

Таким образом $K_{ок}$ можно рассчитать по формуле:

$$K_{ок} = \frac{S}{S_{ок}} = \frac{905,625}{4000} = 0,226 < 0,3$$

После рассмотрения основных параметров трансформатора, следующим этапом является то, что для определения габаритов и массы трансформатора используются различные методы. Оценку габаритов проводят, принимая размеры окна сердечника равными размерам обмотки. «В то же время, для определения массы трансформатора необходимо сложить массу медной обмотки и массу сердечника. Рассчитать массу медной обмотки трансформатора возможно с учетом плотности меди и габаритного объема обмотки, умноженного на коэффициент заполнения окна магнитопровода. Данный коэффициент определяется как отношение занятой площади проводника к площади окна магнитопровода трансформатора» [25, с. 21]. Габаритные размеры и масса трансформатора показаны на рисунке 16.

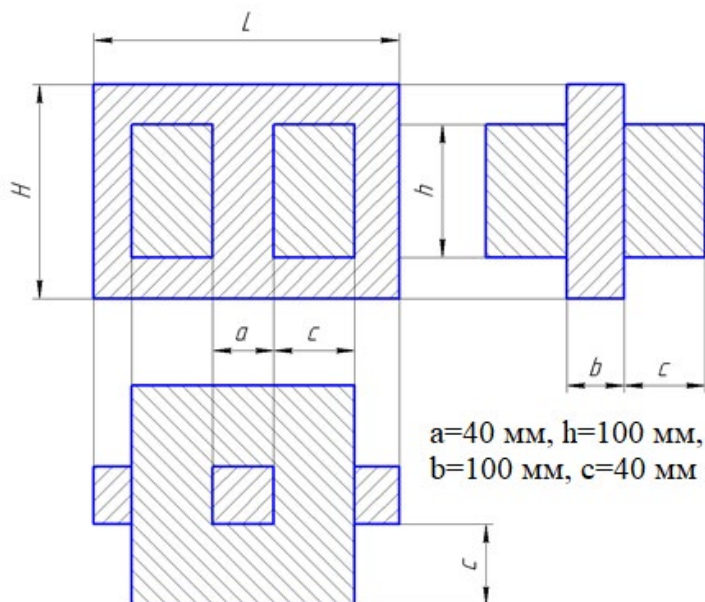


Рисунок 16 - Габаритные размеры и масса трансформатора

«Оценивая массу трансформатора, мы учитываем, что она формируется

как сумма массы сердечника и массы проводов, применяемых для создания обмоток.» [12, с. 22]

$$m_{тр} = m_{маг} + m_{обм} \quad (15)$$

$m_{тр}$ - масса трансформатора;

$m_{маг}$ - масса магнитопровода;

$m_{обм}$ - масса обмотки.

$$m_{обм} = K_{ок} \cdot \rho_{медь} \cdot V \quad (16)$$

$m_{обм}$ - масса обмотки;

$K_{ок}$ - количество витков обмотки;

$\rho_{медь}$ - ПЛОТНОСТЬ МЕДИ;

V - объем.

$$V = (2 \cdot c + a) \cdot h \cdot (2 \cdot c + b) - a \cdot b \cdot h \quad (17)$$

V - объем;

a, b, c - стороны;

h - ВЫСОТА.

$$\rho_{медь} = 8930 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$m_{тр} = 9,86 + 3,552 = 13,412 \text{ кг}$$

$$m_{обм} = 0,226 \cdot 8930 \cdot ((2 \cdot 0,040 + 0,040) \cdot 0,1 \cdot (2 \cdot 0,040 + 0,1) - 0,040 \cdot 0,1 \cdot 0,1) = 3,552 \text{ кг}$$

2.2.7 Определение схемы зажигания электрического разряда в излучателе

При рассмотрении газоразрядных устройств важно учитывать, что в их первоначальном состоянии наблюдается ограниченная электрическая проводимость. Это свойство может приводить к разрыву электрической цепи. В момент включения устройства инициируется процесс зажигания, который характеризуется проявлением электрической проводимости газа в промежутке между электродами благодаря процессу ионизации.

Среди методов зажигания газового разряда в лазерных устройствах с небольшой и средней мощностью наиболее распространенными являются применение статического электрического поля, применение высокочастотного электрического поля и использование высоковольтных импульсов.

«Определение оптимального метода зажигания газоразрядного прибора зависит от его режима работы и технических требований. Для этого используются электрические поля, которые характеризуются двумя основными параметрами: напряжением зажигания и временем запаздывания. Особенностью напряжения зажигания является его случайное распределение по нормальному закону и различие в значениях. Для обеспечения надежного зажигания излучателя необходимо подать достаточное напряжение к электродам прибора. Время запаздывания зажигания состоит из двух компонентов: статического времени запаздывания, которое представляет собой промежуток между моментом приложения напряжения к межэлектродному промежутку и появлением первого инициирующего электрона, способного вызвать пробой, и времени формирования разряда, которое является интервалом времени между появлением первого инициирующего электрона и пробоем промежутка. Для обеспечения надежности зажигания газоразрядного прибора важно учитывать данные параметры. При давлении до 50 мм рт.ст., характерном для излучателей на основе гелий-неона и углекислоты $\tau_{зан} \approx 1\text{мс}$, требуется оптимальная схема источника питания, обеспечивающая непрерывную работу

излучателя и накачку активной среды разрядом постоянного тока. В данном случае наиболее подходящим способом зажигания является автоматическое зажигание статическим электрическим полем от умножителя напряжения. Для этого достаточно использовать один каскад умножения, чтобы получить удвоенное напряжение на сглаживающем емкостном фильтре силовой части источника питания для зажигания излучателя» [2, с. 23]. Важно учитывать, что неправильное зажигание может негативно сказаться на работе излучателя.

Используя «мостовой выпрямитель и схему автоматического зажигания» [11, с. 23], управляемую умножителем напряжения, на рисунке 17 представлен новый вид функциональной схемы источника питания.

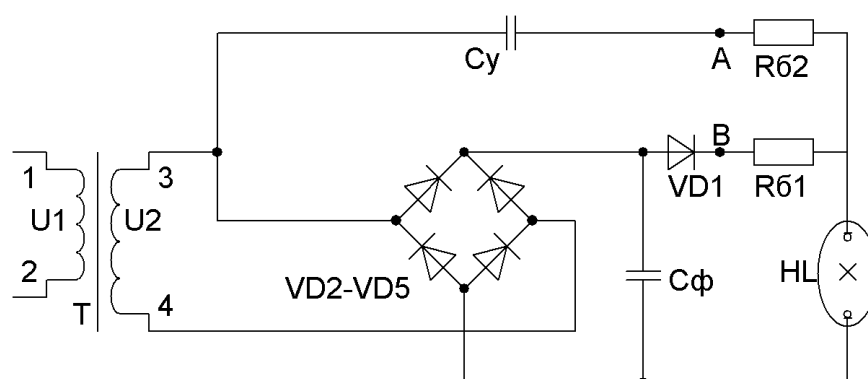


Рисунок 17 - Функциональная схема источника питания

1) «для конденсатора $C_y \ll C_\phi$ » [11, с. 23]

$$C_y = (0,5 \dots 0,1) \cdot C_\phi = (0,552 \dots 0,11) \text{ мкФ}$$

2) Рассмотренный в работе конденсатор К75-15 обладает емкостью 0,25 мкФ и номинальным напряжением 16 кВ, а также не превышает массу в 3000 граммов и обладает размерами, где $A=40\text{мм}$, $L=85\text{мм}$, $B=120\text{мм}$, $H=140\text{мм}$, $h=62\text{мм}$. В соответствии с данными, изложенными в [2] на странице 320, данный конденсатор соответствует указанным параметрам. «Ранее в работе был рассмотрен эскиз данной серии конденсаторов для резистора» [3, с. 24]

3) $R_{62} \gg R_\phi$.

$$R_{б2} = 3R_{б} = 3 \cdot 16 \cdot 10^3 = 48 \text{кОм}$$

$R_{б}$ – значение сопротивления резистора.

Резистор СЗ-9 показанный на рисунке 18, рассмотренный в данной работе, соответствует параметрам, установленным в источнике [11] на странице 129, включая номинальное сопротивление, предельное «рабочее напряжение, номинальную мощность и массу» [13, с. 24] в 210 грамм.

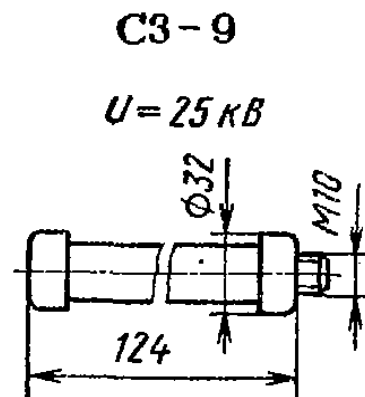


Рисунок 18 - СЗ – 9

$\tau_{\text{зап}} \approx < C_y \cdot R_{б2} < T_c$, «где T_c - период сетевого изменения напряжения» [19, с. 24].

$$T_c = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{мс}$$

T_c - период сетевого изменения напряжения;

f_c – расстояние.

$$1 \cdot 10^{-3} \approx < 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 51 \cdot 10^3 < 20 \cdot 10^{-3}$$

$$1 \cdot 10^{-3} \approx < 12,75 \cdot 10^{-3} < 20 \cdot 10^{-3}$$

4) «для диода» [11, с. 24] $U[U_0 + I_0 \cdot R_{б}]_{\text{обртах}}$ и $I_{0_{\text{пртах}}}$

$$U_0 + I_0 \cdot R_{б} = 12,0417 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^3 = 12,842 \text{кВ}$$

«Выбранный ранее диодный столб КЦ201Е соответствует указанным

параметрам.» [6, с. 24]

2.2.8 Выбор компонентов (для передачи информации, коммутации и обеспечения безопасности)

2.2.8.1 Определение информационного элемента

«Обеспечение оператора необходимой информацией о состоянии и функционировании информационных элементов (ИП) достигается с помощью применения стрелочных измерительных приборов, сигнальных ламп и светодиодных индикаторов в качестве приборов. В рамках реализации текущего курсового проекта возникает необходимость выполнения расчетов информационного элемента - неоновой лампы, применяемой в качестве световых индикаторов электрических сигналов или напряжения. Работа неоновых ламп основана на принципе тлеющего разряда и характеризуется тремя электрическими параметрами: напряжением горения $U_{гор}$, максимальным рабочим током горения $I_{гор}$ и напряжением зажигания $U_{заж}$, которое, как и у излучателей, также имеет значение» [4, с. 25]. Неоновая лампа продемонстрирована на рисунке 19.

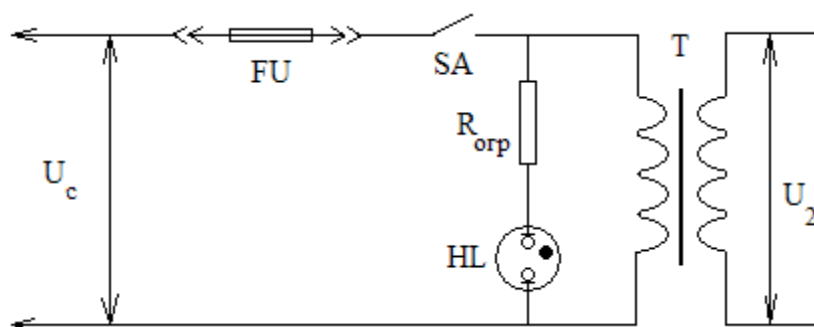


Рисунок 19 - Неоновая лампа

«С помощью параллельного подключения неоновых ламп к первичной обмотке трансформатора можно осуществить проверку функционирования выключателя SA, исправности предохранителя FU и наличия сетевого напряжения. Этот метод, изображенный на рисунке 19, является наиболее

распространенным. При выборе неоновой лампы необходимо учитывать ее параметры, чтобы избежать необходимости использования специальных схем зажигания. Для этих целей была выбрана неоновая лампа ТН-0,5, рисунок 20, обладающая соответствующими параметрами ([3] стр. 108): $U_{\text{заж}} = 90\text{В}$, $U_{\text{гор}} = 55\text{В}$, $I_{\text{max раб}} = 0,5\text{мА}$, $m = 10\text{г}$ » [7, с. 25].

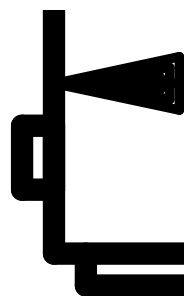


Рисунок 20 - ТН – 0,5

«Неоновая лампа, подключенная к электросети, не оказывает влияния на работу силового трансформатора Т» [9, с. 25]. Однако, при установке неоновой лампы в источнике питания необходимо выбрать соответствующий патрон, учитывая конструктивные особенности лампы. В случае, если серийно производимый патрон не совместим с выбранной лампой, требуется разработать новую конструкцию патрона. Для лампы, имеющей цоколь 1Ш15, необходимо выбрать патрон ПШМ1 $\varnothing 20\text{В}7$, рисунок 21, который будет применен для крепления лампы на корпусе источника питания. Характеристики подходящего патрона, указанные в [6] на странице 514, включают в себя его массу, которая равна 30 граммам.



Рисунок 21 - ПШМ1 ø20В7э

Включение неоновой лампы в электрическую схему, параллельно с ограничивающим резистором $R_{огр}$, требует анализа последовательной комбинации данного элемента с вышеупомянутой лампой. Если же неоновая лампа включается последовательно с ограничивающим резистором, то последний проявляет свою функциональность, в соответствии с принципом работы данной схемы.

Для определения сопротивления и мощности рассеивания ограничивающего резистора можно использовать следующие уравнения, соответственно:

$$R_{огр} = \frac{(U_c - U_{гор})}{I_{гор}} \quad (18)$$

$R_{огр}$ - ограничивающий резистор;

$I_{гор}$ - значение силы тока горения;

$U_{гор}$ - значение напряжения горения.

$$R_{огр} = \frac{(220 - 55)}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 340(\text{кОм}) \approx 360(\text{кОм}) \text{ («по Е24» [10, с. 27])}$$

$$P_{огр} = (U_c - U_{гор}) \cdot I_{гор} \quad (19)$$

$P_{огр}$ - ограничивающая мощность;

$I_{гор}$ - значение силы тока горения;

$U_{гор}$ - значение напряжения горения;

U_c - значение среднего напряжения.

$$P_{огр} = (220 - 55) \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 82,5(\text{мВт}) \approx 91(\text{мВт}) \text{ («по Е24» [9, с. 27])}$$

$$U_{сгор_{max}} \quad (20)$$

$$U_{max}$$

$U_{сгор_{max}}$ - значение среднего максимально напряжения горения;

U_{max} - значение максимального напряжения.

«Выбираем резистор МРХ, рисунок 22 [11 с. 154], его характеристики»
[15, с. 27]:

$$R = 360\text{кОм};$$

$$P = 0,125\text{Вт};$$

$$U_{пред} = 250\text{В};$$

$$m = 1 \text{ г.}$$

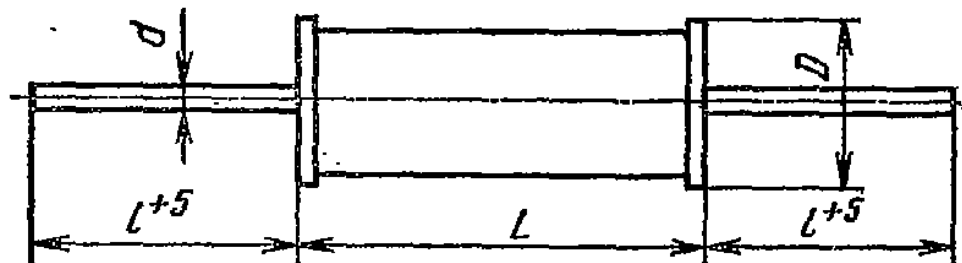


Рисунок 22 – МРХ

«Размеры: D=10мм; L=32мм; l=20мм; d=0,8мм.» [16, с. 27]

2.2.9 Выключатель и его выбор

Для обеспечения безопасности и надежности работы индукционного нагревательного устройства (ИП) необходимо использование специальных элементов управления и защиты. «Использование одного выключателя SA для управления источником питания с автоматической схемой зажигания достаточно, что упрощает процесс управления. Для отключения источника питания ИП наиболее оптимальными являются тумблер или движковый переключатель, которые обеспечивают высокую надежность и визуальную фиксацию состояния, независимо от исправности других элементов источника питания» [17, с. 28]. Таким образом, оператору предоставляется возможность быстро и безопасно прекратить работу ИП в случае необходимости. Коммутационные устройства, используемые в индукционных нагревательных устройствах (ИП), имеют основными электрическими параметрами диапазон коммутируемых напряжений и токов.

При разработке конструкции источника питания, выбор коммутирующих элементов зависит от этих параметров и требований к надежности и безопасности работы устройства. Правильный выбор и настройка коммутационных устройств в источнике питания является важным фактором для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации устройства.

Для использования в индукционном нагревательном устройстве (ИП) выключатель электросети должен удовлетворять ряду требований. В частности, ему необходимо коммутировать напряжение $U_c = 220\text{В}$ и ток первичной обмотки силового трансформатора $I_1 = 3,424\text{А}$. Несмотря на вышесказанное, важно, чтобы крепление данного элемента на передней панели источника питания было удобным и эргономичным.

Один из выключателей, который удовлетворяет этим требованиям, - тумблер Т1 [16]. Он обладает следующими характеристиками: максимальное коммутируемое напряжение U_{max} , максимальный рабочий ток I_{max} и масса $m = 19\text{г}$. Использование тумблера Т1 [16] позволяет обеспечить эффективную

и безопасную работу ИП, так как этот выключатель имеет оптимальные параметры для коммутации первичной обмотки силового трансформатора.

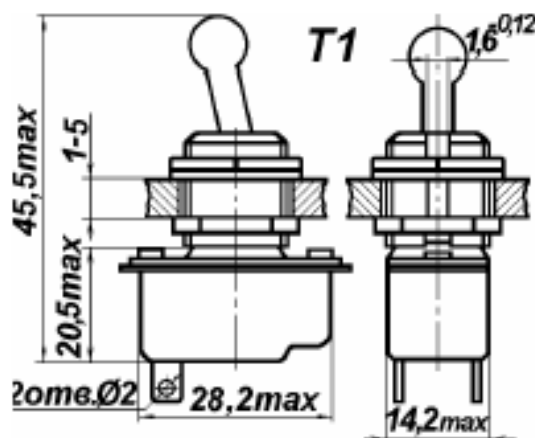


Рисунок 23 - ТВ1 – 1

Кроме того, удобная конструкция тумблера Т1 [16] обеспечивает простоту его установки на передней панели ИП и удобный доступ к нему при необходимости. ТВ1 – 1 продемонстрирован на рисунке 23.

2.2.10 Предохранитель и его выбор

«У применения индукционных нагревательных устройств может возникнуть нештатная ситуация, в результате которой может произойти резкое увеличение потребляемого тока от первичного источника. Если индукционное устройство функционирует с промышленной электросетью переменного тока, то нештатные сверхтоки могут вызвать перегрузку соединительных проводов, силового трансформатора и диодов выпрямителя. Чтобы исключить такие ситуации, на входе индукционного нагревательного устройства устанавливают плавкий предохранитель, который является пассивным элементом защиты от перегрузки по току. Плавкий предохранитель обладает способностью быстрого перегорания при превышении определенного тока, что приводит к автоматическому отключению источника питания от нагрузки» [8, с. 28].

При выборе плавкого предохранителя для защиты ИП следует учитывать не только номинальное значение тока срабатывания, но и пусковые токи, которые могут возникнуть при включении. Для этого номинальный ток срабатывания должен быть выбран на уровне 1,5...3 раза выше среднего тока первичной обмотки силового трансформатора. «Однако, пусковые токи могут иметь значительно большую амплитуду, поэтому необходимо учитывать их при выборе плавкого предохранителя. Кроме того, при выборе значения тока срабатывания необходимо учитывать и максимально допустимые аварийные всплески тока, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации защищаемого ИП» [10, с. 28].

«Для защиты от перегрузки в ИП используется плавкий предохранитель Н520-6А/250В 5х20мм [16]» [20, с. 28], который предназначен для коммутации напряжений до 250В. Размеры данного предохранителя равны 5 мм в диаметре и 20 мм в длине, а его масса составляет 2 грамма. «Установка плавкого предохранителя является одним из способов обеспечения пассивной защиты от перегрузки по току для источника питания. При выборе такого предохранителя необходимо учитывать его номинальный ток срабатывания, который должен быть на 1,5...3 раза выше среднего тока первичной обмотки силового трансформатора. Кроме того, при выборе значения тока срабатывания нужно учитывать пусковые токи, которые могут возникать при включении ИП» [20, с. 28]. Номинальное рабочее напряжение плавкого предохранителя обычно составляет 250В. Предохранитель Н520 показан на рисунке 24.

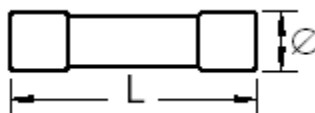


Рисунок 24 - Н520

«С целью упрощения процесса замены предохранителя в ИП, в его

конструкцию включается специальный держатель. Для размещения выбранного предохранителя (H520-6A/250В 5x20мм [16]) необходимо использовать держатель HF-301 5x20мм [16], показанный на рисунке 25. Данный держатель имеет следующие характеристики: максимальное рабочее напряжение, максимальный рабочий ток и масса $m=40$ г.» [6, с. 28]. При выборе держателя предохранителя необходимо учитывать, что он должен соответствовать размерам выбранного предохранителя и иметь достаточную надежность и прочность. Кроме того, необходимо убедиться, что максимальное рабочее напряжение и максимальный рабочий ток держателя соответствуют требованиям ИП.

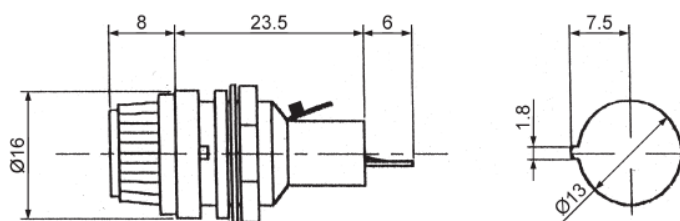


Рисунок 25 - HF-301

На рисунке выше мы видим не большую схему макет держателя.

2.2.11 Заземление

«Сохранение безопасности при работе с электрическим оборудованием требует использования защитного заземления, которое является неотъемлемой частью защиты от поражения электрическим током и предназначено для отключения источника питания (ИП) в случае повреждения изоляции. С целью снижения напряжения на поверхности корпуса индукционного нагревательного устройства (ИП) до безопасного уровня, применяется защитное заземление, которое обеспечивает соединение металлических частей, включая корпус, ИП с заземлителем. При повреждении изоляции и возможном контакте человека с корпусом, заземление обеспечивает низкое сопротивление пути тока, что значительно снижает ток, проходящий через тело человека.

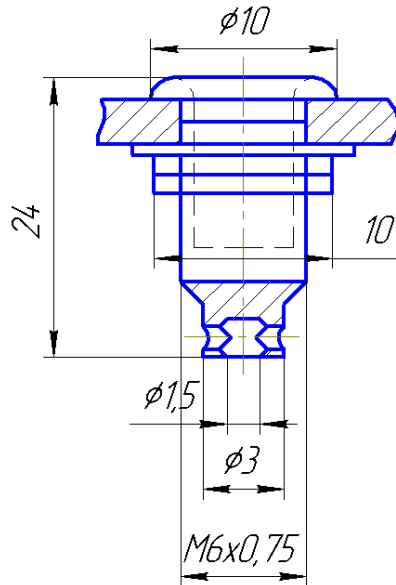


Рисунок 26 - ГН – 4

При разработке источника питания с напряжением переменного тока 380 В и выше или постоянного тока 440 В и выше необходимо предусмотреть защитное заземление, которое может быть реализовано через клемму заземления и гнездо ГН-4 ([5] стр. 283), рисунок 26, обеспечивая электрический контакт с корпусом и минусовым выводом выходного напряжения в конструкции источника питания» [9, с. 29].

2.3 Удельные характеристики ИП для лазера

2.3.1 КПД ИП для лазера

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \quad (21)$$

«где $P_{\text{вых}} = P_{\text{эн}}$ - мощность, потребляемая излучающим устройством от электрической сети,

$P_{\text{вх}} = U_c \cdot I_{1\text{мп}}$ - мощность, потребляемая из электросети,

где $I_{1\text{мп}}$ - описывает ток, протекающий через первичную катушку трансформатора.» [18, с. 31]

$$\eta = \frac{P_{\text{эн}}}{U_c \cdot I_{1\text{мп}}} = \frac{602,085}{220 \cdot 3,424} \cdot 100\% = 79,93\%$$

2.3.2 Удельная массовая мощность ИП для лазера

$\rho_m = \frac{P_{\text{вых}}}{m}$, «используется символ "m", обозначающий массу индукционного прибора (ИП для лазера), которая вычисляется по данной формуле.» [19, с. 31]

$$m = m_{\text{кор}} + m_{\text{крышки}} + \sum m_C + \sum m_R + \sum m_{VD} + m_{\text{трансф}} + m_{\text{тумб}} + m_{\text{неон.лам.}} + m_{\text{напр}} + m_{\text{ост}}$$

«под $m_{\text{ост}}$ имеются в виду весовые характеристики остальных небольших компонентов, таких как винты, провода, печатные платы и т.д. Предположим, что $m_{\text{ост}} = 0,5\text{кг}$, тогда» [10, с. 31]

$$m = 5,832 + 5,682 + (3 + 3 + 13) + (0,098 + 0,210 + 0,006) + 5 \cdot 0,09 + 13,412 + 0,019 + 0,04 + 0,01 + 0,5 = 45,259\text{кг}$$
$$\rho_m = \frac{602,085}{45,259} = 13,303\text{Вт/кг}$$

2.3.3 Удельная объемная мощность ИП для лазера

«В результате выполнения квалификационной работы нами был получен ИП для лазера размером 410x415x414 мм.» [8, с. 31]

$$\rho_V = \frac{P_{\text{вых}}}{V}, \quad (21)$$

V - объем ИП для лазера;

$P_{\text{вых}}$ - значение выходной мощности.

$$V = 410 \cdot 450 \cdot 414 = 76383000\text{мм}^3 = 0,0764\text{м}^3$$

$$\rho_V = \frac{602,085}{0,0764} = 78882,448\text{Вт/м}^3$$

Заключение

Разработан источник питания для CO₂ лазера в рамках выполнения выпускной квалификационной работы. Данный источник питания обладает набором особенностей и характеристик, которые были определены и реализованы в процессе разработки. Параметры данного источника питания составляют 410x450x414 мм, а его вес равен 45,259 кг. КПД источника питания составляет 79,93%. Также, источник питания обладает удельной массовой мощностью 13,303 Вт/кг.

Углекислотные лазеры обычно требуют электрического источника питания для своей работы. Электрическая энергия используется для питания насосной системы, которая возбуждает активную среду лазера, состоящую из смеси газов, включая углекислый газ (CO₂). Насосная система может использовать высокочастотные электрические разряды или лазерные диоды, которые передают энергию в активную среду и создают условия для генерации лазерного излучения. Таким образом, электрический источник питания играет важную роль в работе углекислотного лазера в косметологии.

Проектирование источника питания для лазера предполагает учет оптимального расположения его элементов на приборной панели с целью достижения максимальной компактности и минимизации зазоров между ними. Расположение конденсаторов в вертикальной плоскости помогло уменьшить площадь поверхности прибора, однако привело к увеличению его высоты. Для оптимизации данной конструкции возможно использование более компактного расположения деталей в корпусе, что приведет к снижению габаритных размеров. Также рекомендуется уменьшить массу источника питания для лазера, используя конденсаторы других марок или подключив несколько конденсаторов меньшей емкости параллельно. Отметим, что трансформатор и конденсаторы представляют собой основные элементы, оказывающие наибольшее влияние на массу источника питания для лазера.

Список используемых источников

1. Березкин Д. Г. Датчики: теория, применение и новые разработки. М. : Издательский дом "Лори", 2019. 256 с.
2. Белоусов А.И. Оптико-электронные приборы и системы: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 512 с.
3. Гурлев Д.С. Справочник по ионным приборам. - Киев: Техника, 1970. - 180 с.
4. Диоды и их зарубежные аналоги. Справочник/ А.К. Хрулев, Черепанов В.П. В 3 т. Т.1. – М.: ИП РадиоСофт, 1999. – 640с.,ил.
5. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры./ Под ред. Р.Г.Варламова. - М.: Сов. радио, 1972.-856с.
6. Конденсаторы: Справочник /И.И. Четвертков, М.Н. Дьяконов, В.И. Присняков и др.: Под ред. И.И. Четверткова, М.Н. Дьяконова. – М.: Радио и связь, 1993 – 392с., ил
7. Лаврухин, И. С. Ультразвуковые датчики: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 176 с.
8. Н.Н. Новоселов, В.В. Сидоров. Основы технологии создания оптико-электронных систем: учебное пособие. Москва: Физматлит, 2005. Стр. 189.
9. Расчет электрических характеристик газоразрядного излучателя постоянного тока [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 28.07.2008 №123 (ред. От 29.07.2017). URL: https://www.studmed.ru/kurovaya-rabota-istochniki-pitaniya-lazerov_78da927ad46.html
10. Расчет нестабилизированного источника питания газоразрядного лазера. Метод. указания. / Составитель В.Н. Гришанов. – Самара: СГАУ, 2003 – 72с.
11. Резисторы: Справочник /В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Патрусевич и др.; Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528с.: ил.

12. Садиков Ю. Новости электроники 5: Информационно-технический журнал. Москва: КОМПЭЛ, 2007.
13. Склярова Л. И. Электроника для начинающих: учеб. пособие. - М.: Радио и связь, 1987. - 288 с.
14. Справочник разработчика и конструктора РЭА Элементная база книга 1/Масленников М.Ю, Соболев Е.А. и др. - М.: Радио и связь, 1993
15. Сидоров И.Н., Скорняков С.В. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. - М.: Радио и связь, 1994.- 320 с.
16. Chipdip [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 28.07.2008 №123 (ред. От 29.07.2017). URL: <http://www.chipdip.ru/>
17. De Silva, C.W. Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 730 p.
18. Dereniak, E.L. and Crowe, D.G. Infrared Detectors and Systems. Hoboken, NJ: Wiley, 2013. 432 p.
19. Infomart [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 28.07.2008 №123 (ред. От 29.07.2017). URL: <http://www.infomart.ru/content/docs/1787.html>.
20. Laser Fundamentals by William T. Silvast. 586p.
21. Pallas-Areny, Ramon, and John G. Webster. Sensors and Signal Conditioning. New York: Wiley, 2001. 614 p.
22. Power Electronics: Converters, Applications, and Design by Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins. 784 pages.
23. Santos, J. P. Ultrasonic Sensors: Technologies and Applications. New York: CRC Press. 2012. 163 p.
24. Soloman, S. (2001). Sensors and Control Systems in Manufacturing. New York: CRC Press. 371 pages.
25. Solid-State Laser Engineering by Walter Koechner. 800 pages.