

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ  
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.  
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности 1-36 04 01  
«Программно-управляемые электронно-оптические системы»*

Минск БГУИР 2019

УДК 681.7.02-027.31(0.76)  
ББК 34.964-02я73  
Б76

Рецензенты:

кафедра менеджмента технологий государственного учреждения образования  
«Институт бизнеса Белорусского государственного университета»  
(протокол №9 от 25.04.2018);

кафедра телекоммуникационных систем учреждения образования  
«Белорусская государственная академия связи»  
(протокол №8 от 04.05.2018);

доцент кафедры лазерной техники и технологии  
Белорусского национального технического университета  
кандидат технических наук, доцент Р. В. Федорцев

**Боженков, В. В.**

Б76 Проектирование программно-управляемых электронно-оптических систем. Курсовое проектирование : пособие / В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич. – Минск : БГУИР, 2019. – 107 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-465-9.

В пособии сформулированы основные задачи и тематика курсового проектирования, даны характеристики основных видов проектов, приведены рекомендации по оформлению курсовых проектов, описан порядок подготовки проектов к защите и их защиты. Приведен список нормативно-технической документации, рекомендованной для использования при курсовом проектировании, а также виды и правила оформления конструкторских документов.

Заключительные разделы посвящены рассмотрению типовых конструкций и методикам расчета электронных пушек, устройств отклонения и фокусирования электронного луча, систем микроперемещений и привода.

Предназначено для студентов и руководителей курсового проектирования.

УДК 681.7.02-027.31(076)  
ББК 34.964-02я73

ISBN 978-985-543-465-9

© Боженков В. В., Шахлевич Г. М., 2019  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Проектирование программно-управляемых электронно-оптических систем» играет ключевую роль в процессе подготовки специалистов с высшим образованием в области электронно-оптических систем, представляющих совокупность устройств и приспособлений, предназначенных для получения и формирования концентрированных энергетических потоков различной природы (электронных, ионных, рентгеновских, световых, акустических), управляемых с помощью заданных программ и используемых для обработки материалов, контроля, диагностики и управления в производстве изделий электронной техники, общего и точного электронного машиностроения. Данная дисциплина ориентирована на изучение инновационных и энергосберегающих инженерных решений и технологий проектирования, программно-управляемых электронно-оптических систем и обеспечение высокого качества продукции.

Целью курсового проектирования является систематизация, углубление и активное применение знаний, полученных в лекционном курсе, а также на практических и лабораторных занятиях, подготовка к выполнению дипломного проекта.

Независимо от поставленной задачи (проектирование, модернизация, исследование и т. п.) при написании курсовых проектов должны быть разработаны текстовые и графические документы, которые в совокупности содержат решение задачи.

К текстовым документам при написании курсовых проектов относят пояснительную записку, спецификации, эксплуатационную и другую техническую документацию.

Содержанием пояснительной записки является описание решения поставленной задачи и обоснование принятых технических, экономических и технико-экономических решений. Пояснительная записка включает текст, иллюстрации, формулы, расчеты и таблицы.

К графическим документам при курсовом и дипломном проектировании относят:

- чертежи (общего вида, сборочные, электромонтажные и др.);
- диаграммы и схемы различных видов и типов;
- схемы алгоритмов и программ;
- планы зданий и этажей, схемы расположения оборудования и др.;
- плакаты.

Основным содержанием графических документов является изображение объекта проектирования, а также изображение процессов, поясняющих функционирование объекта. Графические и текстовые документы курсового проекта (работы) должны быть оформлены в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД (Единой системы конструкторской документации), стандартов ЕСПД (Единой системы программной документации) и стандартов СПДС (Системы проектной документации для строительства).

# 1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

## 1.1 Задачи курсового проектирования

Основными задачами курсового проектирования являются систематизация теоретических знаний, полученных за время изучения дисциплины, и развитие навыков самостоятельной инженерной деятельности при проектировании современных устройств электронно-оптической техники, высокоэффективных технологических процессов (ТП), автоматизированного технологического оборудования и оснащения.

В процессе курсового проектирования студент обязан:

- совместно с руководителем четко сформулировать цели и задачи проекта;
- провести анализ литературных источников, патентной и реферативной информации и определить прототип для разрабатываемого устройства или ТП;
- выбрать наиболее оптимальный вариант компоновки разрабатываемого изделия;
- разработать методику проектирования, построить модель проектируемого процесса и провести его оптимизацию;
- выполнить конструкторские расчеты для проектируемого устройства или процесса;
- выполнить экспериментальные исследования и определить оптимальные параметры процесса или устройства;
- дать технико-экономическое обоснование разработанного устройства или процесса.

## 1.2 Тематика курсовых проектов

Тематика курсовых проектов должна предусматривать решение конкретных технических задач в области проектирования современных конструкций электронно-оптических систем (ЭОС) на основе современных достижений науки и техники с использованием автоматизированных устройств, современной элементной базы, материалов и комплектующих, средств автоматизации проектирования и производства. Для курсового проектирования выбираются темы, которые отличаются новизной, оригинальностью, актуальностью и выполнение которых способствовало бы получению определенного производственного, экономического или научного результата.

Примерный перечень тем курсовых проектов:

- 1 Разработать конструкцию прибора для анализа параметров лазерного излучения.
- 2 Разработать конструкцию лазерной системы для сварки катодного узла мощного генераторного прибора.
- 3 Разработать конструкцию стенда для центрировки лимбов кодовых дисков фотоэлектрических датчиков угла.

4 Разработать конструкцию электронно-лучевой системы для прошивки микроотверстий в маске цветного кинескопа.

### **1.3 Организация курсового проектирования**

Курсовое проектирование регламентируется Положением об организации и проведении курсового проектирования в БГУИР №43-2013/03-0018 от 11.12.2013. Оно проводится по темам, которые утверждаются на заседании кафедры. В течение двух первых недель курсового проектирования руководитель совместно со студентом составляет задание на курсовое проектирование, в котором определяет исходные данные, объем проекта и детальный календарный план работы над ним. Допускается выполнение групповых курсовых проектов по сложным темам комплексного характера. При этом каждый студент выполняет и оформляет в виде пояснительной записки, графического материала и приложений свою законченную часть работы так, чтобы можно было оценить его квалификацию по всем направлениям профессиональной подготовки.

При работе над курсовым проектом студент должен проявлять самостоятельность и инициативу в разработке вариантов и выборе окончательного технического решения. Задача руководителя проекта – направлять работу и предостерегать студента от грубых ошибок в решении поставленной задачи. За правильность расчетов, грамматические и стилистические ошибки в пояснительной записке полностью несет ответственность студент, являющийся автором проекта.

Согласно утвержденному графику руководитель проводит опросы, на которых оценивается объем выполненной работы и ее соответствие заданию.

По завершении курсового проектирования руководитель проекта проверяет расчетно-пояснительную записку и графическую часть проекта с целью определения их готовности. Готовый проект подписывается студентом и руководителем. Заведующий кафедрой назначает комиссию для приемки курсовых проектов и сроки защиты. Студент, не выполнивший курсовой проект в срок или получивший при защите неудовлетворительную оценку, не допускается к экзамену по дисциплине.

Защита курсового проекта производится перед комиссией в следующей последовательности:

- доклад студента, в котором излагаются и обосновываются основные инженерные решения проекта;
- ответы на вопросы членов комиссии;
- вынесение решения комиссии.

Необходимо продумать содержание и форму выступления, уделив большую часть времени изложению новизны предлагаемого конструкторского решения, сопоставлению полученных результатов с существующими аналогами, а также вопросам технико-экономической эффективности предложенных решений.

Ответы студента на вопросы должны подтверждаться чертежами, таблицами, графиками, макетами и т. п. После обсуждения курсового проекта комиссия выносит решение об оценке проекта.

#### **1.4 Задание на курсовое проектирование**

Тип курсового проекта, а следовательно, и его содержание, определяются заданием на курсовое проектирование, которое составляется руководителем и утверждается кафедрой ЭТТ. Проекты могут быть конструкторского, технологического и исследовательского профилей, а также на разработку методов и средств автоматизации проектирования и производства ЭОС. Задание оформляется на типовом бланке, в котором указываются:

1 Тема проекта.

2 Срок сдачи.

3 Исходные данные. Приводятся назначение и основные параметры устройства, технические характеристики изделий, программа выпуска, комплексный коэффициент технологичности блока (устройства) ЭОС, условия эксплуатации. При проектировании технологического оборудования и оснащения указываются: производительность, потребляемая мощность, системы питания, габариты, масса.

4 Содержание расчетно-пояснительной записки:

- введение;
- обоснование темы проекта;
- анализ технического задания и аналитический обзор современных конструкторских решений в данном направлении;
- разработка структурной схемы процесса, компоновок, алгоритмов и т. п.;
- исследование и построение математических и физических моделей;
- оптимизация конструкции, конструкторские и другие расчеты;
- заключение;
- список использованных источников.

5 Перечень графического материала. В курсовом проекте приводятся только те чертежи, которые самостоятельно разработаны студентом. В число обязательных иллюстративных материалов должны входить структурная схема, сборочный чертеж разработанного или модернизированного изделия, компоновки и сборочные чертежи технологического оборудования и оснастки, чертежи деталей, графики исследований, алгоритмы прикладных программ, циклограммы работы оборудования и т. п. Если в курсовом проекте разрабатывается специальное технологическое оборудование, то в число обязательных чертежей должны также входить принципиальные электрические, оптическая, кинематическая и другие схемы, чертежи промежуточных сборочных единиц, а также приводиться описания технологических процессов, в которых оно используется.

## 2 ВИДЫ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

### 2.1 Комплектность конструкторских документов

В ходе курсового проектирования разрабатываются графические (чертежи, схемы, графики) и текстовые (спецификации, перечни элементов, эксплуатационные инструкции, технические условия и т. д.) конструкторские документы (КД). Комплект КД определяет состав и устройство проектируемого изделия и содержит данные, необходимые для его изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. В соответствии с ГОСТ 2.102–68 КД подразделяют на определенные виды (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Номенклатура конструкторских документов для различных стадий проектирования изделий

Шифр КД	Вид документа	Техническое предложение	Проект		Рабочая документация			
			эскизный	технический	детали	сборочные единицы	комплексы	комплекты
1	2	3	4	5	6	7	8	9
–	Чертеж детали	–	–	О <sup>1</sup>	+ <sup>1</sup>	–	–	–
СБ	Сборочный чертеж	–	–	–	–	+ <sup>2</sup>	–	–
ВО	Чертеж общего вида	О	О	+	–	–	–	–
ТЧ	Теоретический чертеж	–	О	О	О	О	О	–
ГЧ	Габаритный чертеж	О	О	О <sup>1</sup>	О <sup>1</sup>	О <sup>2</sup>	О	–
МЭ	Электромонтажный чертеж	–	–	–	–	О	–	–
МЧ	Монтажный чертеж	–	–	–	–	О	О	О
УЧ	Упаковочный чертеж	–	–	–	О	О	О	О
–	Схемы	О	О	О	–	О	О	О
–	Спецификация	–	–	–	–	+	+	+
ВС	Ведомость спецификаций	–	–	–	–	О	О	О
ВД	Ведомость ссылочных документов	–	–	–	–	О	О	О
ВП	Ведомость покупных изделий	–	О	О	–	О	О	О
ДП	Ведомость держателей подлинников	–	–	–	–	О	О	О
ВИ	Ведомость согласования применения покупных изделий	–	О	О	–	О	О	О

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПТ	Ведомость технического предложения	+	-	-	-	-	-	0
ЭП	Ведомость эскизного проекта	-	+	-	-	-	-	-
ТП	Ведомость технического проекта	-	-	+	-	-	-	-
ПЗ	Пояснительная записка	+ <sup>3</sup>	+ <sup>3</sup>	+ <sup>3</sup>	-	-	-	-
ТУ	Технические условия	-	-	0	0	0	0	0
ПМ	Программа и методика испытаний	-	0	0	0	0	0	-
ТБ	Таблицы	0	0	0	0	0	0	0
РР	Расчеты	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>	0	0	0	0
Д	Документы прочие	0	0	0	0	0	0	0
ПФ	Патентный формуляр	0	0	0	0	0	0	-
-	Документы эксплуатационные	-	-	-	0	0	0	0
-	Документы ремонтные	-	-	-	0	0	0	0
КУ	Карта технического уровня и качества	0	0	0	0	0	0	0
И	Инструкция	-	-	-	0	0	0	0

В объеме одного или даже нескольких курсовых проектов, как правило, невозможно представить полный комплект КД на изделие. Поэтому состав и объем КД необходимо согласовывать с руководителем для каждого конкретного случая. Типичной ошибкой этой стадии разработки является большое число упрощенных графических документов общих видов, габаритных чертежей, схем, таблиц и т. д. Наибольший интерес представляет рабочая КД, которая включает сборочные чертежи, принципиальные схемы с перечнем элементов и спецификациями, т. к. именно такая КД позволяет наиболее полно выявить степень профессиональной подготовки студента.

Курсовой проект выглядит слабым при наличии нескольких однотипных чертежей. Даже если между ними существуют различия в деталях, это свидетельствует только об умении разрабатывать однотипные изделия, которые после первой разработки легко поддаются автоматизации.

## 2.2 Обозначение изделий и конструкторских документов

Единая обезличенная классификационная система обозначения изделий и их конструкторских документов устанавливается ГОСТ 2.201–80.

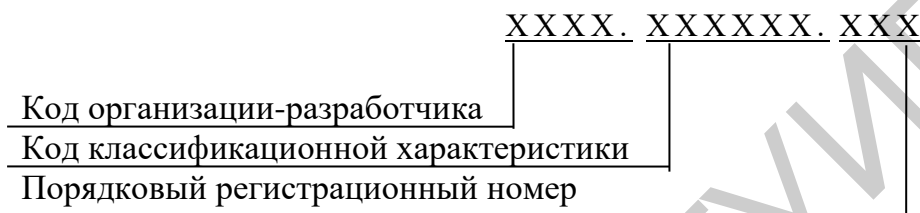
Обозначения изделиям и конструкторским документам должны быть присвоены централизованно или децентрализованно. Централизованное присвоение обозначений должны осуществлять организации, которым это поручено министерством, ведомством, в пределах объединения, отрасли. Децентрализованное присвоение обозначений должны осуществлять организации-разработчики.



Конструкторские документы сохраняют присвоенное им обозначение независимо от того, в каких изделиях они применяются, причем эти обозначения записывают без сокращений и изменений, за исключением случаев, предусмотренных ГОСТ 2.113–75. Если конструкторский документ выполнен на нескольких листах, его обозначение должно быть указано на каждом листе.

Деталям, на которые не выпущены чертежи согласно ГОСТ 2.109–73, присваиваются самостоятельные обозначения по общим правилам.

Согласно ГОСТ 2.201–80 структура обозначения изделия и основного конструкторского документа должна быть следующей:

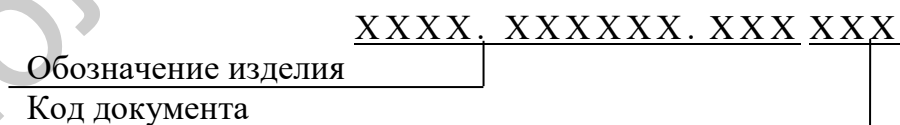


Код классификационной характеристики присваивают конструкторскому документу и изделию в соответствии с классификатором ЕСКД. Структура кода:



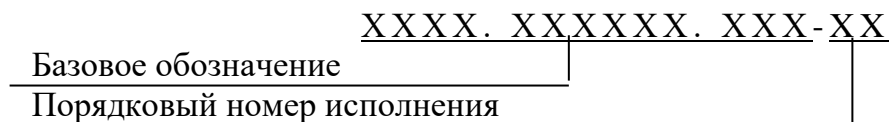
Порядковый регистрационный номер присваивают по классификационной характеристике от 001 до 999 в пределах кода организации-разработчика или организации, осуществляющей централизованное присвоение.

Структура обозначения неосновного КД следующая:



В коде документа должно быть не более четырех знаков, включая номер части документа, например: АВГБ.061341.021СБ; АВГБ.061341.021ТУ1.

Каждому исполнению изделия следует присваивать самостоятельное обозначение:



Примеры: АГВБ. 573241.020-01; АГВБ. 573241.020-02.



Чертеж выполняется с максимальными упрощениями, предусмотренными ГОСТ 2.109–73 и другими стандартами. Составные части изделия (в т. ч. заимствованные и покупные) рекомендуется изображать упрощенно (отдельные – лишь контурными очертаниями), если при этом понятны конструкция, взаимодействие составных частей и принципы работы изделия. Составные части могут изображаться на одном листе с общим видом или на отдельных последующих листах этого чертежа. Наименования и обозначения составных частей изделия должны быть указаны одним из следующих способов:

- на полках линий-выносок, проведенных от деталей на чертеже общего вида;
- в таблице, размещаемой на чертеже общего вида;
- в таблице, выполненной отдельно в виде последующих листов этого чертежа.

Таблица должна состоять из граф: «Поз.», «Обозначение», «Кол.», «Дополнительные указания», если необходимо, «Материал», «Наименование» и др.

При наличии таблицы номера позиций составных частей изделия должны быть указаны на полках линий-выносок в соответствии с этой таблицей. Рекомендуется такая последовательность записи составных частей изделия в таблицу: заимствованные изделия; покупные изделия; вновь разрабатываемые изделия.

Чертеж общего вида следует оформлять в соответствии с правилами, установленными для разработки рабочих чертежей (в отношении расположения номеров позиций, подписей, текста технических требований).

**Сборочный чертеж** изделия (рисунок 2.2) должен быть выполнен с необходимым количеством (в зависимости от сложности конструкции) изображений (видов, разрезов, сечений и выносных элементов), дающих полное представление о габаритах, конструкции, назначении и связи составных частей, взаимодействии их в процессе работы, сборке, разборке и контроле сборочной единицы.

Для полного удовлетворения этих требований согласно ГОСТ 2.102–68 необходимо выполнять, кроме сборочного чертежа, габаритный, монтажный и другие чертежи. В учебных проектах с целью уменьшения объема графических работ эти чертежи рекомендуется совмещать на одном сборочном чертеже.

Сборочный чертеж изделия должен содержать:

- а) изображение сборочной единицы;
- б) размеры с указанием предельных отклонений (и другие параметры и требования), которые проверяются при сборке;
- в) сопряженные размеры с обозначением посадок (в местах установки на валы и в корпус зубчатых и червячных колес, звездочек, шкивов, подшипников, крышек, втулок, муфт и т. д.);
- г) основные размеры, характеризующие изделие и его основные составные части (например, для редуктора: межосевое расстояние с допускаемыми отклонениями; направление линии, угла наклона и число зубьев; модули зубчатых и червячных зацеплений);
- д) номера позиций составных частей, входящих в изделие;



Номера позиций наносят на чертеж один раз. Шрифт номеров позиций должен быть на один (два) размер больше, чем шрифт размерных чисел данного чертежа.

Общая линия-выноска с вертикальным расположением позиций допускается:

- для группы крепежных деталей, расположенных в одном месте;
- для группы деталей с отчетливо выраженной взаимосвязью;
- при невозможности подвести линию-выноску к каждой составной части.

Линию-выноску в этих случаях отводят от изображения составной части, номер позиции которой указан первым.

Сборочный чертеж следует выполнять с максимальными условностями и упрощениями, предусмотренными ГОСТ 2.109–73 (СТ СЭВ 858–78, СТ СЭВ 1182–78) и другими стандартами на оформление чертежей. В частности:

- не показывать выступы, рифления, насечки, оплетки и другие мелкие элементы, маркировочные и технологические данные;
- сварной узел изображать как монолитное тело;
- шестигранные и квадратные головки гаек и винтов изображать упрощенно;
- крепежные детали (винты, болты, шпильки, гайки, шайбы и т. п.), шпонки, сплошные валы, зубья и спицы колес и маховиков условно показывать нерассеченными, если секущая плоскость направлена вдоль оси такой детали;
- если вал имеет углубления, шпоночные пазы, центровые отверстия, то для изображения этих элементов следует применять местные разрезы;
- шарики и ролики подшипников качения показывать нерассеченными;
- ребра жесткости и тонкие стенки показывать рассеченными, но без штриховки;
- пластины, а также элементы деталей (отверстия, фаски, пазы, углубления и т. п.) размером 2 мм и менее изображать с отступлением от масштаба, принятого для всего изображения, в сторону увеличения.

**Технические требования (ТТ) и техническую характеристику (ТХ)** помещают на свободном поле чертежа над основной надписью в виде текстовой части. При недостатке места их продолжают слева от основной надписи. Текст записывают сверху вниз.

Пункты ТТ и ТХ должны иметь самостоятельную нумерацию. Каждый пункт записывают с новой строки. Строки должны быть не длиннее 185 мм. При выполнении чертежа на двух и более листах ТТ и ТХ помещают только на первом листе.

Заголовок «Технические требования» не пишут, если на чертеже помещены только технические требования. ТТ рекомендуется излагать в следующем порядке:

- а) размеры (формовочные и штамповые уклоны, радиусы и пр.); предельные отклонения размеров, формы и расположения поверхностей; дисбаланс;
- б) требования к качеству поверхностей (отделке, покрытию);
- в) зазоры, расположение отдельных элементов конструкции;

- д) требования, предъявляемые к настройке и регулированию изделия;
- е) другие требования к качеству, например, бесшумность, виброустойчивость и т. п. ;
- ж) условия и методы испытаний;
- з) указания о маркировании и клеймении;
- и) правила транспортирования и хранения;
- к) особые условия эксплуатации;
- л) ссылки на другие документы, содержащие ТТ, распространяющиеся на данное изделие и не приведенные на чертеже.

ТХ следует помещать отдельно от ТТ под заголовком «Техническая характеристика», который располагается над ТТ. Оба заголовка не подчеркивают.

Примеры оформления технических требований и технической характеристики на изделие приведены на сборочном чертеже (см. рисунок 2.2).

## 2.4 Схемы

Схемы – конструкторские документы, на которых составные части изделия, их расположение и связи между ними изображены условно, – позволяют значительно быстрее (чем по чертежам) разобраться в принципе и последовательности действия элементов того или иного устройства. Виды, типы и общие требования к выполнению схем установлены ГОСТ 2.701–76.

В зависимости от элементов, входящих в состав изделия, и связей между ними схемы разделяют на следующие виды: кинематические (К), гидравлические (Г), пневматические (П) и электрические (Э). По основному назначению схемы делят на определенные типы, обозначаемые соответствующей цифрой:

1 – структурные, служащие для общего ознакомления с изделием и определяющие состав и взаимосвязь основных элементов изделия, а также их назначение;

2 – функциональные, поясняющие процессы, протекающие в изделии и его составных частях;

3 – принципиальные, определяющие полный состав элементов изделия и связи между ними;

4 – монтажные, показывающие соединения составных частей изделия и элементы этих соединений (провода, кабели, трубопроводы и т. п.);

5 – схемы подключения, показывающие внешнее подключение изделия;

6 – общие, определяющие составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации;

7 – схемы расположения, определяющие относительное расположение составных частей изделия.

Вид и тип схемы определяют ее наименование, например, схема электрическая монтажная. Шифр схемы, входящий в состав ее обозначения, состоит из буквы (вид) и цифры (тип), например, шифр схемы электрической принципиальной – ЭЗ.

Если в состав изделия входят элементы и связи различных видов, разрабатывается комбинированная схема, обозначаемая буквой С. Ее наименование определяется видом и типом, например, схема электропневматическая принципиальная.

Схемы выполняют без соблюдения масштаба на листах стандартного формата с основной надписью по форме 1. При этом действительное пространственное расположение составных частей изделия можно не учитывать. Элементы изделия изображают в виде условных графических обозначений, устанавливаемых соответствующими стандартами ЕСКД. Связь между ними показывают линиями связи, условно представляющими собой валы, муфты, трубопроводы, кабели и т. п.

Схемы следует выполнять компактно, но не за счет ухудшения ясности и удобства их чтения. Количество изломов и пересечений линий связи должно быть минимальным. Элементы, составляющие отдельное устройство, на схеме выделяют штрихпунктирными линиями с указанием его наименования.

На схеме одного вида допускается изображать элементы схем других видов, непосредственно влияющих на работу изделия. Эти элементы и их связи изображают штриховыми линиями.

Схемам присваивают обозначение соответствующего им изделия. После обозначения следует записывать шифр схемы. Наименование схемы указывают в основной надписи после наименования изделия.

**Схемы кинематические.** В соответствии с ГОСТ 2.703–68 на кинематической схеме (рисунок 2.3) необходимо изображать всю совокупность кинематических элементов и их соединений, все кинематические связи между парами, цепями и т. п., а также связи с источниками движения. Кинематическую схему изделия следует вычерчивать, как правило, в виде развертки. Допускается изображать схемы в аксонометрических проекциях и, не нарушая ясности схемы, переносить элементы вверх или вниз от них истинного положения, а также поворачивать их в положения, наиболее удобные для изображения. Сопряженные звенья пары, вычерченные отдельно, следует соединять штриховой линией.

Все элементы схемы должны быть изображены условными графическими обозначениями по ГОСТ 2.770–68 или упрощенно внешними очертаниями.

Элементы схемы следует изображать:

- валы, оси, стержни и т. п. – сплошными основными линиями;
- элементы, изображенные упрощенно внешними очертаниями (зубчатые колеса, червяки, шкивы, звездочки и т. п.), – сплошными тонкими линиями толщиной  $s/2$ ;
- контур изделия, в который вписана схема, – сплошными линиями толщиной  $s/3$ ;
- кинематические связи между сопряженными звеньями пары, вычерченными отдельно, – штриховыми линиями толщиной  $s/2$ ;
- крайнее положение элемента, меняющего свое положение при работе изделия, – тонкими штрихпунктирными линиями с двумя точками;

- валы и оси, закрытые другими элементами (невидимые), – штриховыми линиями. Пресекающиеся валы и оси в местах пересечения изображают без разрыва.

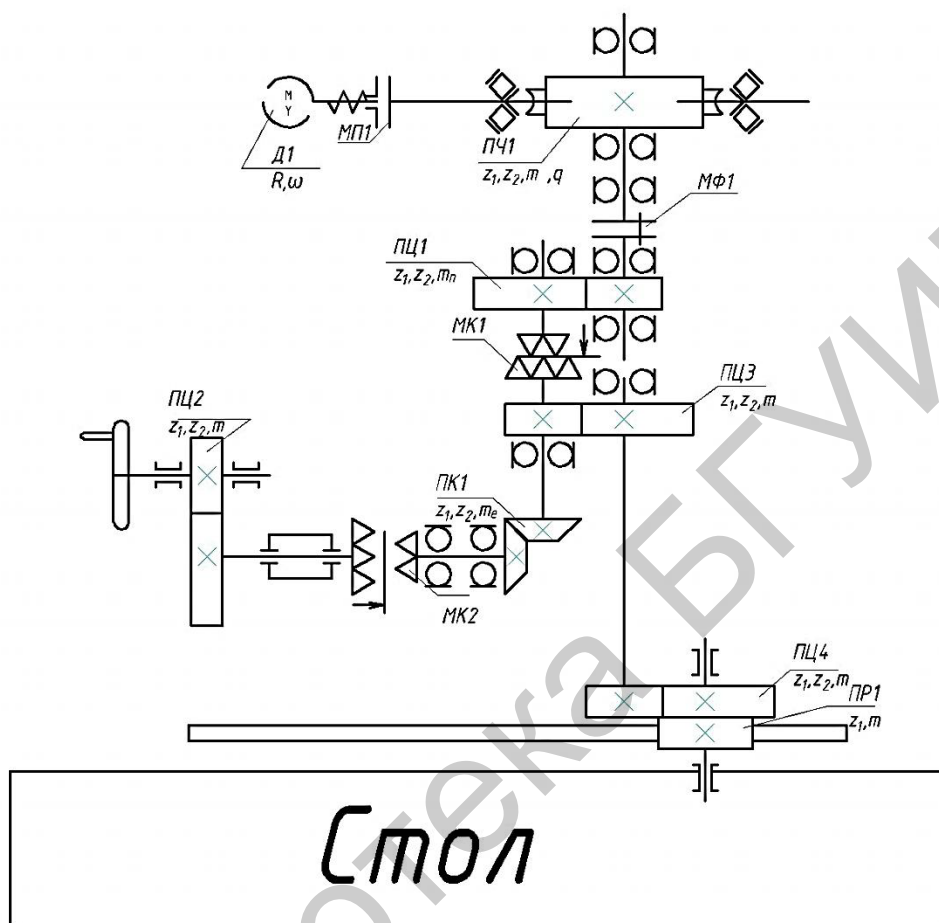


Рисунок 2.3 – Пример выполнения схемы кинематической

Каждому кинематическому элементу, начиная от источника движения, присваивается порядковый номер. Валы нумеруют римскими цифрами, остальные элементы – арабскими. Элементы покупных или заимствованных механизмов не нумеруют, порядковый номер присваивают всему механизму. Номер проставляют на полке линии-выноски. Под полкой необходимо указывать основные характеристики и параметры этого элемента:

- мощность электродвигателя (Вт) и частоту вращения его вала ( $\text{мин}^{-1}$ ) (угловую скорость ( $\text{рад/с}$ )), или мощность и частоту вращения входного вала агрегата;
- вращающий момент ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ ) и частоту вращения ( $\text{мин}^{-1}$ ) выходного вала;
- число и угол наклона зубьев, модуль зубчатых и червячных колес, а для червяка – число заходов, модуль и коэффициент диаметра;
- диаметр шкивов ременной передачи;
- число зубьев звездочек, шаг цепи и т. п.



Наименование каждой кинематической группы элементов (например, привод подачи) нужно наносить на полке линии-выноски, проведенной от этой группы. Сменные кинематические элементы, например, групп настройки, следует обозначать на схеме буквами латинского алфавита и указывать в таблице характеристики для сменных элементов. Таблицу допускается выполнять на отдельных листах, элементам порядковый номер не присваивается.

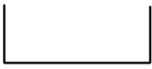







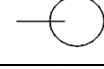
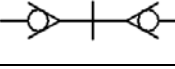

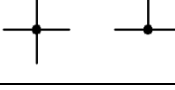





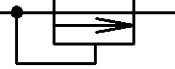

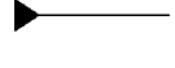

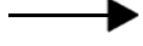
Пример выполнения кинематических схем с указанием элементов и основных характеристик этих элементов приведен на рисунке 2.3. Вал электродвигателя Д1 мощностью  $P$  (кВт), вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  (рад/с), при помощи предохранительной муфты МП1 соединен с червячной передачей и имеет следующие параметры: модуль  $m$  (мм), число заходов  $z_i$ , коэффициент диаметра червяка  $q$  и число зубьев колеса  $z_2$ . Глухая (фланцевая) муфта МФ1 связывает вал червячного колеса с валом шестерни первой цилиндрической косозубой передачи ПЦ1 и имеет следующие параметры: модуль нормальный  $m_n$  (мм), угол наклона зубьев  $\beta$  (град), число зубьев шестерни и колеса  $z_1$  и  $z_2$ . С помощью кулачковой муфты МК1 вал колеса этой ступени соединен с валом шестерни второй цилиндрической прямозубой передачи ПЦ2 с параметрами  $m$ ,  $z_1$  и  $z_2$ . Далее движение передается зубчатыми колесами цилиндрической передачи ПЦ4. С колесом этой ступени соединена шестерня реечной передачи ПР1, предназначенная для перемещения стола. При ручном перемещении стола движение от маховика через цилиндрическую передачу ПЦ3, кулачковую муфту МК2, коническую передачу ПК1, цилиндр, цилиндрические передачи ПЦ2 и ПЦ4 и реечную передачу ПР1 передается столу.

**Схемы гидравлические и пневматические** выполняются по правилам, установленным ГОСТ 2.701–76 и ГОСТ 2.704–76, причем их элементы следует изображать в виде условных графических обозначений по ГОСТ 2.780–68, ГОСТ 2.782–68 и ГОСТ 2.784–70 (таблица 2.2).

Элементы следует показывать на схеме, как правило, в исходном положении (например, обратный клапан – в закрытом положении). Каждый элемент схемы должен иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение, наносимое рядом с его условным изображением (справа или над ним) и включающее прописную букву (или буквы) русского алфавита и стоящую рядом цифру. Буквы и цифры следует выполнять чертежным шрифтом одного размера. Буквенное обозначение должно состоять из одной или двух начальных или характерных букв названия элемента (например, КП – клапан предохранительный). Цифра, входящая в позиционное обозначение, означает порядковый номер элемента в пределах группы элементов с одинаковым буквенным обозначением.

Нумерация должна выполняться по порядку, начиная с единицы (например, для воздухосборников – ВС1, ВС2 и т. д.). Порядковые номера следует присваивать в зависимости от расположения элементов на схеме: сверху вниз или слева направо. Данные об элементах должны быть записаны в таблицу перечня элементов, размещаемую над основной надписью.

Таблица 2.2 – Условные графические обозначения элементов гидравлических и пневматических схем

Наименование элементов	Условное обозначение	Наименование элементов	Условное обозначение
Бак (резервуар)		Фильтр для жидкости или воздуха	
Бак с внутренним давлением выше атмосферного		Влаго- и маслоотделитель с ручным спуском конденсата	
Аккумулятор гидравлический или пневматический		Клапан обратный	
Насос шестеренный		Муфта без обратных клапанов	
Насос лопастный центробежный		Муфта с обратными клапанами	
Гидромотор (общее обозначение)		Соединение линий связи	
Гидромотор регулируемый с постоянным направлением потока		Трубопровод гибкий	
Насос ручной		Удаление воздуха из гидросети	
Насос винтовой		Клапан предохранительный	
Насос ротационный лопастный		Подвод жидкости под давлением	
Вентилятор центробежный		Слив жидкости из системы	

В графах перечня следует указывать:

- в графе «Поз. обозначение» – буквенно-цифровое обозначение элемента;
- в графе «Наименование» – его наименование. Одинаковые элементы допускается записывать в одну строку с занесением в графу «Поз. обозначение» двух их позиционных обозначений и более;

- в графе «Кол.» – количество одинаковых элементов.

Перечень элементов заполняется в порядке, рекомендованном ГОСТ 2.704–76. Линии связи (трубопроводы) следует нумеровать по порядку, начиная с единицы, причем номера наносятся около обоих концов изображения этих линий. На линиях связи допускается указывать направление потока рабочей среды, например, в виде треугольников (зачерненных или без зачернения).

В случае когда линия связи является внутренним каналом какого-либо элемента, перед ее номером следует ставить позиционное обозначение данного элемента, отделенное от номера точки.

Примеры гидравлической и пневматической схем приведены на рисунках 2.4 и 2.5. На принципиальной гидравлической схеме (см. рисунок 2.4) показан электродвигатель *M*, вращающий ротационный лопастный насос, который через фильтр  $\Phi 1$  забирает масло из бака *Б1* и подает через клапан *КВ1* к месту слива, где происходит охлаждение обрабатываемой детали. После охлаждения масло попадает в бак *Б3* и через фильтр  $\Phi 3$  возвращается в бак *Б1*. Прекращение подачи масла на охлаждение обеспечивается закрытием клапана *КВ1*. При закрытом клапане *КВ1* и продолжающейся работе насоса *Н1* может возникнуть избыточное давление, в результате чего откроется предохранительный клапан *КП1*, через который масло сливается обратно в бак.

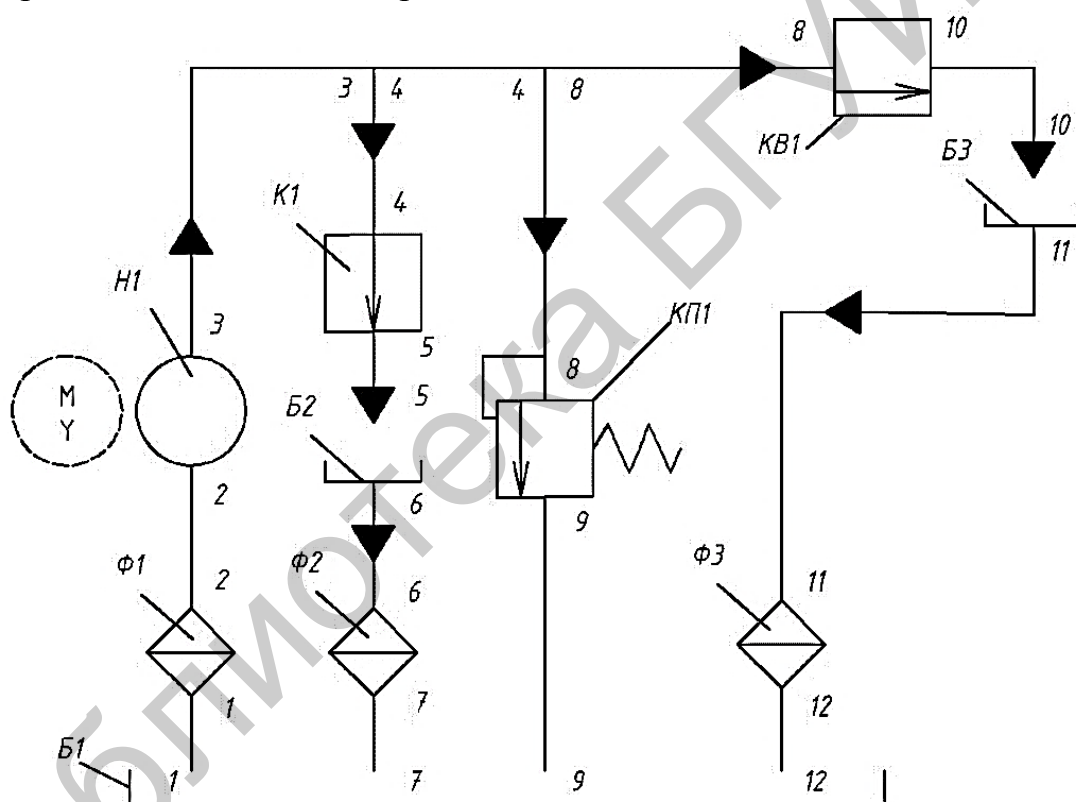


Рисунок 2.4 – Пример схемы принципиальной гидравлической

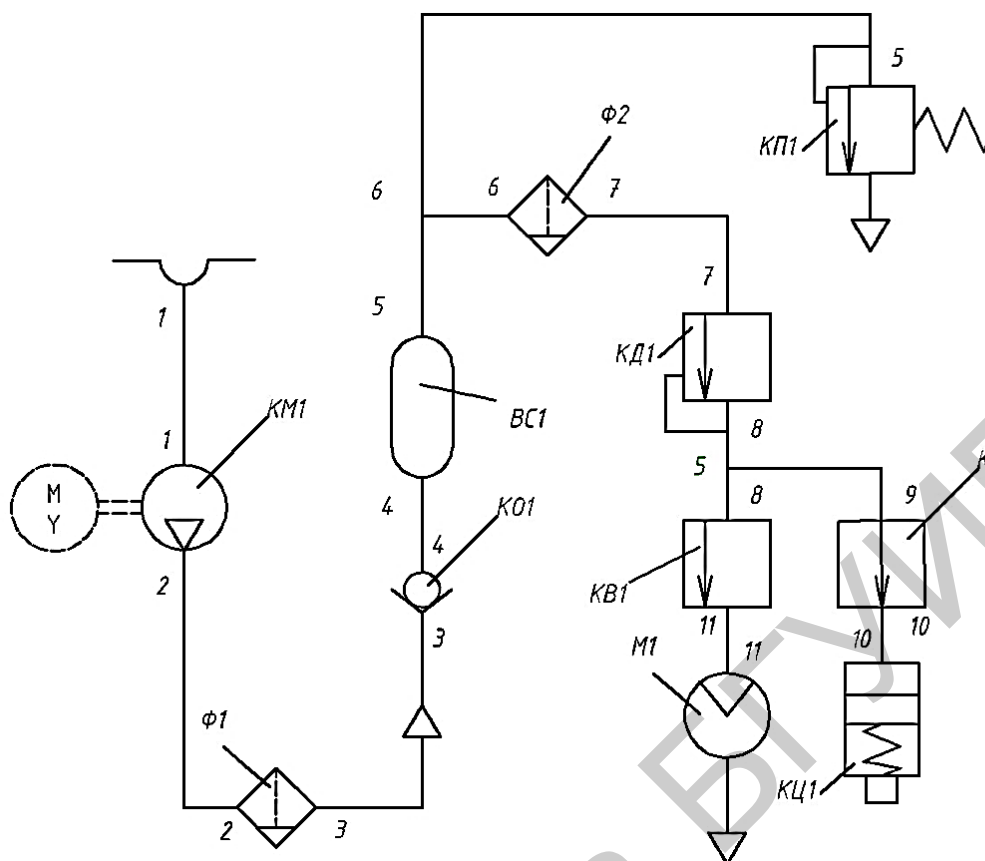


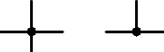

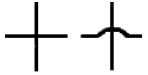


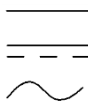
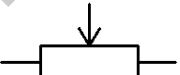
Рисунок 2.5 – Пример схемы принципиальной пневматической

Согласно схеме принципиальной пневматической (см. рисунок 2.5) атмосферный воздух через заборник 1 попадает в компрессор КМ1. Сжатый воздух из компрессора КМ1 поступает через фильтр-влажготделитель  $\Phi 1$  и обратный клапан КО1 в воздухохборник ВС1, где создается его запас. Через фильтр-влажготделитель  $\Phi 2$  сжатый воздух поступает в редукционный клапан КД1, который понижает давление до необходимого для работы пневмомотора М1. При открывании клапана КВ1 сжатый воздух попадает к пневмомотору М1, который и приводит в действие инструмент. При подъеме давления в воздухохборнике ВС1 выше допустимого срабатывает предохранительный клапан КП1.

**Схемы электрические** выполняются в соответствии с правилами, установленными ГОСТ 2.701–76, ГОСТ 2.702–75 и ГОСТ 2.708–81. В схемах следует применять условные графические обозначения элементов, предусмотренные стандартами седьмой классификационной группы (таблица 2.3).

Изделие на схеме следует изображать в отключенном состоянии. На принципиальной электрической схеме должны быть изображены все электрические элементы, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, электрические связи между ними и элементы (зажимы, разъемы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы на схеме рекомендуется группировать в соответствии с функциональным назначением в горизонтальные и вертикальные цепи.

Таблица 2.3 – Условные графические обозначения элементов электрических схем

Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
Линия электрической связи, провод, кабель, шина. Общее обозначение		Амперметр	
Соединение линий связи		Вольтметр	
Перекрещивание линий связи		Счетчик ватт-часов	
Машина электрическая (общее обозначение)		Элемент гальванический аккумуляторный	
Двигатель трехфазный с соединением обмотки статора в звезду		Лампа накаливания	
Трансформатор		Диод полупроводниковый	
		Заземление	
Токосъемник троллейный		Выключатель однополюсный	
Предохранитель пробивной		Выключатель трехполюсный	
Предохранитель плавкий (общее обозначение)		Род тока: постоянный, переменный	
Резистор переменный		Полярность: положительная, отрицательная	
Конденсатор		Катушка индуктивности; дроссель без сердечника	

Элементы должны быть соединены линиями электрической связи. При этом расстояние между параллельными линиями должно быть не менее 3 мм. При большом числе линий связи и их большой протяженности можно группировать электрически не связанные линии, увеличивая расстояние между группами. Вход единичной линии в групповую и выход из нее должны обозначаться буквами или цифрами. Каждый элемент схемы должен иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение, наносимое рядом с его условным графическим обозначением (сверху или справа). Позиционное обозначение должно состоять в общем случае из трех частей:

- буквенный код элемента, определяющий его вид, – одна или несколько букв латинского алфавита (например, *R* – резистор);
- порядковый номер элемента в пределах группы элементов одного вида – одна или несколько арабских цифр;
- буквенный код функционального назначения данного элемента – одна или несколько букв латинского алфавита.

Нумерацию элементов выполняют по порядку, в соответствии с расположением элементов, считая сверху вниз и слева направо. Буквы и цифры обозначения следует выполнять чертежным шрифтом одного размера. Расположение условных обозначений элементов определяется последовательностью процесса и удобством чтения схемы, возможностью нанесения позиционных обозначений и при необходимости номинальных параметров элементов.

На схемах рекомендуется приводить характеристики входных и выходных цепей (ток, напряжение, частоту и т. п.) и адреса внешних соединений, записывая их в таблицы, помещаемые взамен условных графических обозначений (плат, разъемов и т. п.). Таблицы должны иметь позиционное обозначение записываемого элемента.

Данные об элементах схемы должны быть записаны в таблицу перечня элементов, помещаемую на первом листе схемы или на отдельных листах формата А4 в виде самостоятельного текстового документа и заполняемую сверху вниз. Перечень элементов, помещенный на листе схемы, должен располагаться над основной надписью на расстоянии не менее 12 мм. Его продолжение можно помещать слева от основной надписи, повторяя головку таблицы. При выполнении перечня отдельным текстовым документом в графе 1 основной надписи следует записывать наименование изделия, для которого составлен перечень, а под ним делать запись «Перечень элементов» шрифтом, на один или два размера меньшим того, каким записано наименование изделия. В графе 2 следует размещать шифр «П», присвоенный документу, а вслед за ним – шифр схемы, например, ПЭЗ – перечень элементов схемы электрической принципиальной.

В графах перечня необходимо приводить следующие данные:

- в графе «Поз. обозначение» – позиционное обозначение элемента;
- в графе «Наименование» – наименование элемента схемы в соответствии с документом, на основании которого он применен;
- в графе «Кол.» – количество одинаковых элементов;
- в графе «Примечание» – технические данные элемента, не содержащиеся в его наименовании.

Элементы в перечень следует вносить по группам в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений, а в пределах каждой группы – в порядке возрастания номеров. Элементы одного вида с одинаковыми параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, рекомендуется записывать одной строкой с указанием в графе «Поз. обозначение» обозначения с наименьшим и наибольшим порядковыми номерами, а в графе «Кол.» – общего числа этих элементов. Если в перечень вносят элементы одной группы с одина-

ковым буквенным обозначением, то в графе «Наименование» общее их наименование записывают в виде заголовка (без повторения наименования элемента в каждой строке) и подчеркивают сплошной тонкой линией. Не следует повторять и обозначения документа, на основании которого применены элементы данной группы с различными параметрами.

Элементы с регулируемыми параметрами на схеме обозначаются звездочкой и на свободном поле в ТТ помещается сноска «Подбирается при регулировании», а в графе «Примечание» перечня элементов указываются предельные допустимые значения параметров. При выполнении схемы допускается:

- при наличии в изделии нескольких одинаковых элементов, соединенных параллельно, изображать только одну ветвь с указанием числа ветвей в месте ответвления и позиционного обозначения всех элементов;

- при наличии в изделии нескольких одинаковых элементов, соединенных последовательно, изображать и обозначать только крайние элементы. Электрические связи между ними показывают штриховыми линиями, над которыми указывают общее число одинаковых элементов. В перечень такие элементы записывают в одну строку.

На электрической принципиальной схеме (рисунке 2.6) показан трехфазный асинхронный двигатель *M* с соединением обмотки статора в звезду, приводящий во вращение ведомые массы через электромагнитную муфту *У1*.

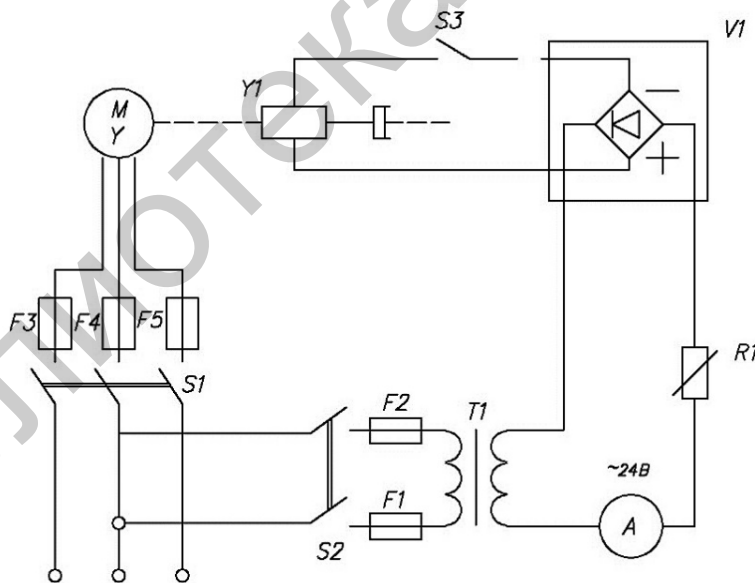


Рисунок 2.6 – Пример выполнения схемы электрической

Двигатель соединен с источником питания (сеть переменного тока напряжением 380 В) с помощью трехполюсного выключателя *S1* через плавкие предохранители *F3*, *F4* и *F5*. Муфта питается постоянным током, напряжение которого по условиям техники безопасности не должно превышать 24 В. Для обеспечения этого в схему включены однофазный трансформатор *T1* и выпрямительное устройство *V1*. При подключении первичной обмотки трансформатора





могут быть показаны и другие положения, например, крайние. При необходимости допускается обозначать оси прописными буквами русского алфавита.

Кроме того, на оптической схеме следует указывать:

- положение диафрагм;
- положение зрачков (при необходимости);
- положение фокальных плоскостей, плоскостей изображения и предмета (при необходимости, например, для фотографических объективов и объективов микроскопов);
- положение экранов, светорассеивающих полостей и поверхностей (при необходимости).

Номера позиций элементам схемы следует присваивать по ходу луча. При разветвлении схемы в несколько направлений номера позиций указываются по одному из направлений до конца, затем последующие номера позиций по другим направлениям.

Если в схему изделия входит элемент, имеющий самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), то его следует изобразить упрощенно (рисунок 2.7, позиция 12), обвести тонкой штрихпунктирной линией и указать размеры, определяющие его положение.

Повторяющимся элементам необходимо присваивать один и тот же номер позиции, после которого в скобках допускается ставить порядковый номер.

На принципиальной оптической схеме следует помещать основные оптические характеристики изделия в виде записей на поле схемы или таблицы произвольной формы, например:

- для телескопических систем: видимое увеличение, угловое поле оптической системы в пространстве предметов, диаметр выходного зрачка, удаление выходного зрачка от последней поверхности, предел разрешения, коэффициент пропускания (при необходимости);
- для фотографических объектов: фокусное расстояние, относительное отверстие, угловое поле оптической системы в пространстве предметов или размер кадра, разрешающую способность и коэффициент пропускания (при необходимости);
- для фотоэлектрических систем: размеры фотокатодов или типы фотоприемников, размеры светового пятна на фотокатодах (при необходимости).

На оптической схеме в зависимости от типа следует указывать:

- диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения (при необходимости);
- воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное расположение оптических элементов, зрачков, фокальных плоскостей, плоскостей изображения и плоскостей предмета (для систем, работающих на конечном расстоянии), источников излучения и приемников энергии;
- размеры, определяющие пределы рабочего перемещения или предельные углы поворота оптических деталей;

- размеры, определяющие положение оптической системы относительно механических частей прибора, например, размер, определяющий положение объектива микроскопа относительно нижнего среза тубуса);
- габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса (при необходимости).

## 2.5 Спецификация

Спецификацию – документ, определяющий состав изделия и всей конструкторской документации, относящейся к нему, – составляют на отдельных листах формата А4 на каждую сборочную единицу, комплекс и комплект. Заглавный лист оформляют по форме 1, с основной надписью – по форме 2, а последующие листы – по форме 1а, с основной надписью – по форме 2а (ГОСТ 2.104–68).

В зависимости от состава специфицируемого изделия спецификация может состоять из разделов, которые следует располагать сверху вниз в следующей последовательности:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наименование разделов записывают в виде заголовков в графе «Наименование» строчными буквами и подчеркивают. Ниже заголовка должна быть оставлена одна свободная строка, выше – не менее одной свободной строки.

В раздел «Документация» вносят все документы специфицируемого изделия, кроме его спецификации, а также документы записываемых в спецификацию неспецифицируемых составных частей (деталей) (если таковые используются), кроме их рабочих чертежей.

В разделы «Комплексы», «Сборочные единицы» и «Детали» вносят комплексы, сборочные единицы и детали специфицируемого изделия.

В разделе «Стандартные изделия» записывают изделия, примененные по государственным стандартам, отраслевым стандартам, стандартам предприятий.

В пределах каждой категории стандартов изделия записывают по группам в зависимости от функционального назначения (например, подшипники, крепежные детали и т. п.), в пределах каждой группы – в алфавитном порядке наименований изделий, в пределах каждого наименования – в порядке возрастания обозначений стандартов, а в пределах каждого обозначения стандартов – в порядке возрастания основных параметров или размеров изделия.

В раздел «Прочие изделия» записывают изделия, взятые из каталогов, прейскурантов и других источников, за исключением стандартных изделий. Порядок записи подобен порядку раздела «Стандартные изделия».

В раздел «Материалы» вносят все материалы специфицируемого изделия в следующей последовательности: металлы (черные, магнитоэлектрические и ферромагнитные, цветные); кабели, провода и шнуры; пластмассы и пресс-материалы; бумажные и текстильные, лесные материалы; резиновые, минеральные, керамические и стеклянные материалы; лаки, краски, нефтепродукты и химикаты; прочие материалы. В пределах вида материалов их записывают в алфавитном порядке наименований, в пределах наименования – по возрастанию размеров или других параметров.

Графы спецификации заполняют следующим образом.

В графе «Формат» указывают форматы документов, имеющих обозначение в графе «Обозначение». Если документ выполнен на нескольких листах различного формата, то в графе ставят «\*», а в графе «Примечание» перечисляют все форматы с постановкой этого знака, например, \*А3, А4 А4Х3. Для деталей, на которые нет чертежей, в графе указывают БЧ. Для документов, записанных в разделы «Стандартные изделия», «Прочие изделия» и «Материалы», графу «Формат» не заполняют.

В графе «Зона» указывают обозначение зоны, где находится номер позиции записываемой части изделия (если поле чертежа разбито на зоны по ГОСТ 2.104–68). В графе «Поз.» указывают порядковые номера составных частей в последовательности записи их в спецификации. Графу не заполняют для разделов «Документация» и «Комплекты».

В графе «Обозначение» указывают: для раздела «Документация» – обозначения записываемых документов, для разделов «Комплексы», «Сборочные единицы», «Детали» и «Комплекты» – обозначения основных конструкторских документов на записываемые изделия; для деталей, выпущенных без чертежей, – присвоенное им обозначение (если таковое имеется). Графу не заполняют для разделов «Стандартные изделия», «Прочие изделия» и «Материалы».

В графе «Наименование» указывают:

1) в разделе «Документация»: для документов специфицируемого изделия – только их наименование (например, «Сборочный чертеж», «Габаритный чертеж», «Технические условия», «Пояснительная записка»), для документов на неспецифицируемые части – наименование изделия и документа;

2) в разделах «Комплексы», «Сборочные единицы», «Детали» и «Комплекты» – наименования изделий в соответствии с их основной надписью на основных конструкторских документах; для деталей без чертежа указывают наименование и материалы, а также размеры, необходимые для их изготовления;

3) в разделе «Стандартные изделия» – наименования и обозначения изделий;

4) в разделе «Прочие изделия» – наименования и обозначения изделий по документам на их поставку с указанием обозначений этих документов;

5) в разделе «Материалы» – обозначение материала.

Допускается для изделий и материалов, различающихся размерами и другими данными и примененных по одному документу, общую часть наименования с обозначением документа записывать на каждом листе спецификации один раз в виде заголовка. Под общим наименованием записывать для каждого изделия и материала только их параметры и размеры. Если основные параметры или размеры изделия обозначаются одним числом или буквой, тогда записывают следующим образом:

Подшипники ГОСТ 8338–75;

Подшипник 205;

Подшипник 306 и т. д.

В графе «Кол.» указывают количество составных частей на одно специфицируемое изделие; в разделе «Материалы» – общее количество материала на одно изделие с указанием единицы величины. Последние допускается записывать и в графе «Примечание». Количество таких материалов, как припой, клей, электроды для сварки и т. п., в спецификации не указывают. Эти сведения дают на поле чертежа. В разделе «Документация» данную графу не заполняют. После каждого раздела спецификации необходимо оставлять несколько свободных строк для дополнительных записей. При этом следует резервировать и номера позиций, которые проставляют в спецификации при заполнении резервных строк. Наличие разделов спецификации зависит от состава изделия.

Допускается совмещение спецификации со сборочным чертежом при условии его размещения на листе формата А4. При этом основную надпись выполняют по ГОСТ 2.104–68 (форма 1) с указанием обозначения основного конструкторского документа (спецификации).

## 3 УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

### 3.1 Основные технические требования и структура установок

В зависимости от конкретного технологического процесса, выполняемого на поверхности объекта обработки, требуется обеспечить и поддерживать определенную плотность мощности. Она должна регулироваться в широком диапазоне: от  $10^2$  Вт/см<sup>2</sup> (при нагреве поверхности) до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (при испарении) и даже достигать  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (при размерной обработке с взрывообразным испарением). Это делается достаточно легко, изменяя силу тока  $I_{\text{л}}$ , ускоряющее напряжение  $U_{\text{вск}}$  и поперечные размеры луча, а также временные режимы обработки. Учитывая, что все тепловые воздействия сопровождаются значительным газовыделением из материалов, в конструкциях установок необходимо предусматривать использование таких эмиттеров электродов, которые были бы устойчивы к ионной бомбардировке, или же предотвращать попадание на эмиттер ионов, специально искривляя траекторию электронного луча.

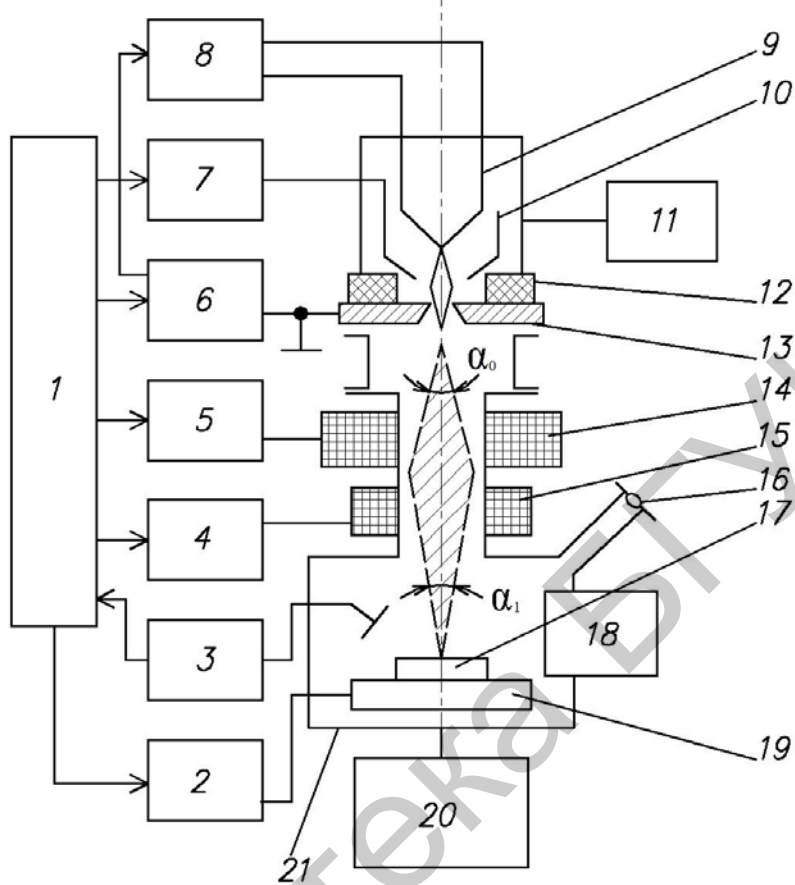
Для формирования потока электронов и транспортировки его к объекту необходим вакуум. Внутри электронных пушек вакуум поддерживают на уровне  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па, а в технологических камерах –  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па. Вследствие значительных габаритов камер и газовыделения из материалов вакуумные системы установок должны обладать высокой производительностью. Одним из существенных преимуществ электронно-лучевой обработки является практически его полная безынерционность. С помощью фокусирующих магнитных и электростатических систем можно формировать луч требуемого сечения, а также направлять его в определенную зону объекта обработки. Отклонение луча по программе с помощью управляющей ЭВМ позволяет резко повысить производительность процессов, точность и воспроизводимость их результатов. Регулируя силу тока накала катода или напряжение на управляющем электроде (модуляторе), можно плавно и быстро изменять силу тока луча. Для повышения производительности используют вакуумные шлюзы, многоместные держатели, транспортирующие устройства и специальные координатные столы.

Так как электронный луч очень чувствителен к электрическим и магнитным полям, то в электронных установках должна быть предусмотрена стабилизация ускоряющего и фокусирующих напряжений, сил токов питания фокусирующих и отклоняющих магнитных систем.

Хотя КПД электронно-лучевого нагрева может быть близким к 100 %, некоторая доля мощности теряется при транспортировке пучка, в частности, вследствие перехвата части электронов анодом пушки. Если же вторичные электроны имеют возможность достигать стенок камеры, то до 20–30 % мощности может быть рассеяно на камере. Это требует применения принудительного охлаждения части узлов установок.

Промышленностью в основном выпускаются электронно-лучевые установки, специализированные по видам процессов. Однако их компоновочные

схемы (рисунок 3.1) различаются незначительно. В установке могут отсутствовать отдельные узлы, роль которых несущественна для реализации выбранного процесса, но при этом могут значительно снизиться их стоимость, уменьшиться габариты и облегчиться условия эксплуатации.



1 – управляющая ЭВМ; 2 – управляющее устройство перемещения объекта; 3 – контрольное устройство; 4 – блок отклонения луча; 5 – блок фокусировки; 6 – высоковольтный выпрямитель; 7 – блок питания модулятора; 8 – блок питания катода; 9 – катод электронной пушки; 10 – модулятор; 11 – система откачки пушки; 12 – изолятор; 13 – анод; 14 – фокусирующая магнитная пушка; 15 – катушка отклонения луча; 16 – система визуального контроля зоны обработки; 17 – объект обработки; 18 – шлюз вакуумный; 19 – механизм крепления и перемещения объекта обработки; 20 – система откачки камеры рабочей; 21 – камера рабочая

Рисунок 3.1 – Типовая схема электронно-лучевой установки

Основными характеристиками термических установок являются: тип электронной пушки, ток луча, ускоряющее напряжение, максимальная мощность, минимальный размер сфокусированного пучка на объекте, плотность мощности, степень стабилизации напряжений и токов, вакуум в электронной пушке и рабочей камере, расход охлаждающей жидкости, габаритные размеры рабочей камеры и всей установки.

Для контроля параметров технологического процесса и электронного потока целесообразно использовать вторичные процессы: вторичную электронную эмиссию, ионизацию паров и остаточных газов. Распределение плотности тока в пучке и его форму контролируют с помощью специальных проволочных зондов.

### 3.2 Основные узлы термических электронно-лучевых установок

**Электронная пушка** является основным узлом всех установок. В зависимости от ее типа и конструкции поток электронов может быть сформирован в виде луча круглого сечения, ленты, клина, кольца, иметь различную энергию, быть непрерывным или импульсным.

Эмиттером электронов в пушках с небольшими силами тока пучка служат вольфрамовые и танталовые термокатоды прямого действия в виде проволочек, стержней, спиралей, таблеток. Однако срок службы таких эмиттеров ограничен и обычно не превышает 20–50 ч, а вследствие их возможной деформации меняются характеристики пушки.

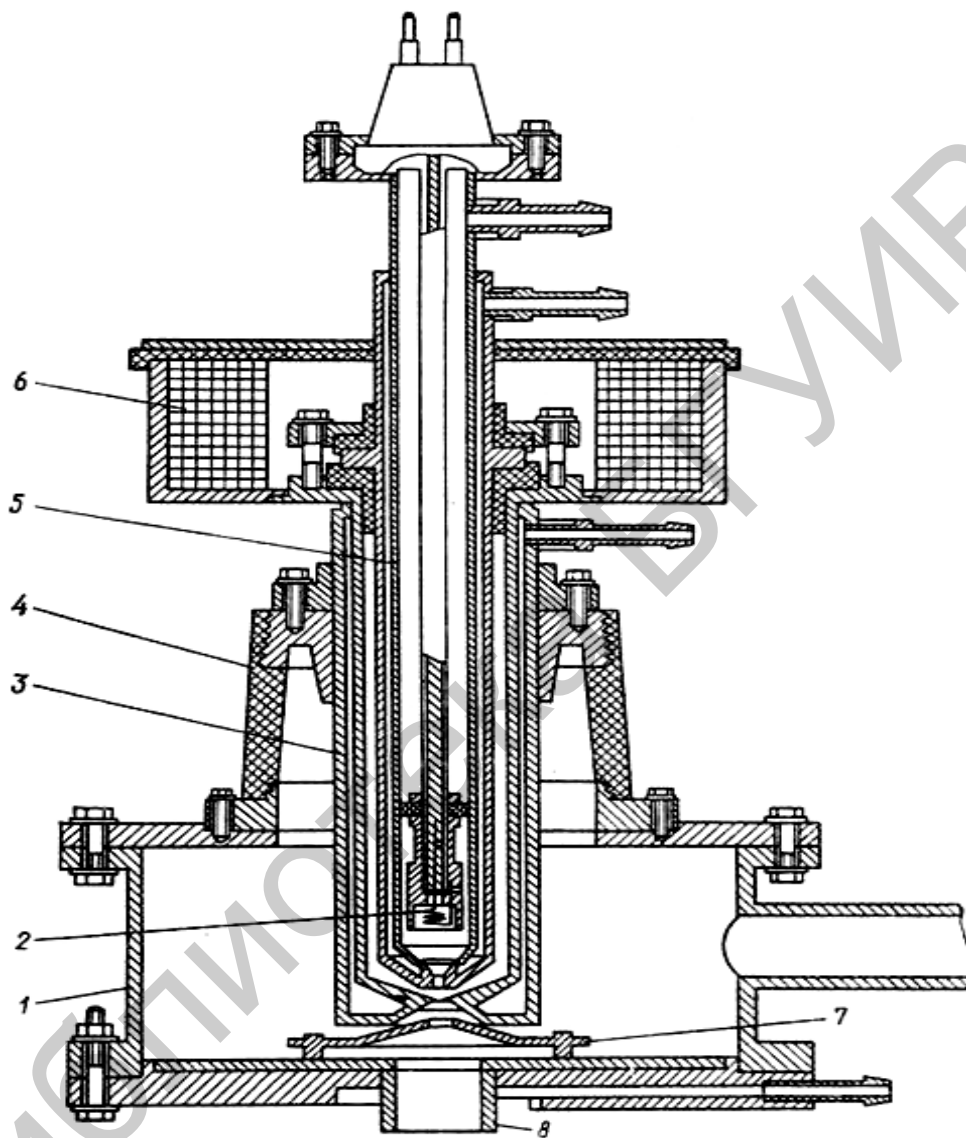
Большая удельная эмиссия при пониженных рабочих температурах (до 200 А/см<sup>2</sup> при 1400 °С), а также устойчивая эмиссия в диапазоне давлений от 10<sup>-2</sup> Па и ниже обеспечивается применением в установках с периодическим напуском атмосферы гексаборидлантановых катодов (LaB<sub>6</sub>) косвенного действия. Для их разогрева используются вольфрамовые подогреватели или электронный подогрев от дополнительного термокатада. Последний способ часто используется в пушках, работающих в условиях интенсивной ионной бомбардировки эмиттера. Такие пушки требуют вспомогательного источника анодного напряжения до 2,0–3,0 кВ.

Для сильноточных электронных потоков целесообразно использовать плазменные эмиттеры на основе тлеющих или дуговых разрядов. Максимальная плотность тока с границы плазмы может достигать 10<sup>3</sup> А/см<sup>2</sup> и более. Чаще всего для эмиссии электронов используют разряд в аргоне, реже – в водороде и воздухе.

Для поддержания плазмы используют разряд Пеннинга при напряжении между электродами около 1,5–2,0 кВ, давлении 10<sup>-2</sup>–10<sup>-3</sup> Па и затрачиваемой мощности до 1,0 кВт. Для устойчивого существования разряда на межэлектродный промежуток накладывают постоянное магнитное поле с индукцией до 0,05 Тл. Расход воздуха составляет 50–100 атм·см<sup>3</sup>/ч. Концентрация электронов в плазме в основном зависит от силы тока разряда, но с повышением напряжения на разрядном промежутке значительное влияние начинают оказывать расход газа и его давление.

Повысить концентрацию электронов можно, если сжать плазму стенками сужающегося полого электрода или воздействовать на нее магнитным полем, концентрируя зону разряда в малом объеме. Такое двойное контрагирование плазмы происходит в дуоплазмотронах. В них разряд зажигают между термокатодом или холодным полым катодом и анодом, в котором имеется эмиссион-

ное отверстие диаметром 0,3–2,0 мм. Конструктивно такая электронная пушка располагается в камере 1 (рисунок 3.2), откачиваемой отдельно от рабочей камеры установки. Через высоковольтный изолятор 4 в камере закреплены катодный узел со сменной вольфрамовой спиралью 2, водоохлаждаемый промежуточный электрод 5 и основной анод 3.



- 1 – камера вакуумная; 2 – спираль вольфрамовая; 3 – анод основной;  
 4 – изолятор; 5 – электрод водоохлаждаемый промежуточный;  
 6 – катушка; 7 – электрод вытягивающий; 8 – патрубок

Рисунок 3.2 – Конструкция дуоплазмотронной плазменной электронной пушки

Промежуточный электрод и корпус анода изготовлены из стали и служат магнитопроводами. Магнитное поле создается катушкой 6. В зазоре по оси между анодом и промежуточным электродом обеспечивается резко неоднородное магнитное поле для сжатия плазмы. Рабочий газ (аргон) подается в полость



промежуточного электрода через регулируемый натекаТЕЛЬ с расходом порядка  $10 \text{ см}^3/\text{ч}$ , при этом в разрядной камере давление составляет 5–10 Па. Максимальное давление ограничено возможностью пробоа, а минимальное – погасанием дуги.

При включении напряжения между термокатодом и промежуточным электродом внутри последнего зажигается несамостоятельный разряд. Он инициирует образование дугового разряда между основным анодом и катодом после включения анодного напряжения. Плазма дуги сжата в канале промежуточного электрода и в разрыве магнитной цепи на выходе из него.

Со стороны плазмы анод окружен слоем пространственного заряда, который формирует границу плазмы в пределах эмиссионного отверстия. Магнитное поле с индукцией порядка 0,2 Тл сконцентрировано в малом зазоре между цилиндрическим промежуточным электродом и анодом. Поле дополнительно сжимает плазменный разряд, увеличивая концентрацию заряженных частиц до  $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . В зависимости от силы тока разряда, вытягивающего напряжения и расстояния между анодом и ускоряющим электродом, форма границы плазмы в области эмиссионного отверстия может быть плоской, выпуклой или вогнутой. Последняя форма способствует начальной фокусировке электронного потока.

Степень ионизации рабочего газа в этой области близка к 100 %. Для извлечения электронов с границы плазмы и начального формирования потока используется конический вытягивающий электрод 7. Обычно он заземлен, а все детали дуоплазмотрона находятся под высоким отрицательным потенциалом. Поток электронов выходит в камеру через вакуумный патрубок 8, где он фокусируется магнитной линзой и отклоняется полем катушек.

Типовые характеристики такого источника: сила тока разряда дуги – 0,1–12 А при напряжении горения дуги 50–150 В; сила тока пучка – до 1,5 А при вытягивающем напряжении до 30,0 кВ. Даже при относительно малых токах разряда порядка 1,5–2,0 А и расходах газа плотность тока с границы плазмы составляет 25–100 А/см<sup>2</sup>, а общий ток – единицы ампер. Используя многоапертурные анодные и вытягивающие системы с большим количеством отверстий, из плазменных эмиттеров можно извлекать токи до тысяч ампер.

Катоды с фиксированной эмиссионной и подвижной плазменной границей являются основными узлами электронных пушек. Наибольшее распространение в установках получили пушки диодного и триодного типов. В триодной конструкции кроме катода и анода используется фокусирующий электрод-модулятор, изменением напряжения на котором управляют силой тока луча. Форма электродов обеспечивает такое распределение потенциалов в промежутке катод – анод, что эмитируемые электроны, ускоряясь к аноду, собираются в сходящийся пучок с минимальным поперечным размером.

Мощность электронного потока можно регулировать, изменяя величины  $I_d$  и  $U_a$ . При этом силу тока луча удобнее устанавливать регулировкой напряжения на модуляторе, чем изменением температурного режима эмиттера, т. к. последний метод весьма инерционен.

Для получения необходимой плотности мощности на объекте обработки пучок фокусируют с помощью электромагнитных линз в виде катушек, размещаемых снаружи колонны. При выполнении технологических операций часто необходимо перемещение сфокусированного пятна, например для подогрева поверхности, сварки по определенному контуру и т. д. С этой целью в пушках предусмотрена система отклонения пучка, которая также выполняется чаще всего в виде электромагнитных катушек, располагаемых за фокусирующей системой по ходу электронного потока.

**Рабочая камера.** Для микрообработки электронным лучом используются малогабаритные камеры со стационарно закрепленными на них пушками. Перемещение объекта внутри герметичной камеры требует применения сложных манипуляторов или специальных устройств с высокой точностью установки изделия, например шаговых двигателей с цифровой индикацией или электрических сервоприводов. Движением луча обычно управляют с помощью ЭВМ, используя отклоняющую систему пушки. Контроль параметров процесса и его результатов осуществляется непосредственно в камере, например, с помощью мониторов вторичной электронной эмиссии.

В установках других классов объемы вакуумной рабочей камеры достаточно велики: от 0,001 до 4,0 м<sup>3</sup>. В них удобно выполнять обработку изделий средних размеров. Пушка может быть закреплена как стационарно, так и перемещаться внутри камеры. Манипуляторы с сервоприводом или электрогидравлическим перемещением координатных столов позволяют предварительно ориентировать изделие перед началом обработки. При открытой для смены изделий камере может быть предусмотрена герметизация пушки механическим затвором при ее непрерывной откачке. Стальной корпус камеры должен иметь толщину, достаточную для обеспечения механической прочности и защиты персонала от рентгеновского излучения. Отвод теплоты, выделяемой на стенках камеры в результате излучения зоны обработки и бомбардировки вторичными электронами, осуществляется проточной технической водой. В корпусе камеры предусматривается смотровое окно из свинцовосодержащего стекла для визуального или оптического контроля процесса обработки.

Для обработки крупногабаритных изделий объем камеры может быть очень большим, например, в установке ЭЛУ-13 он равен 180 м<sup>3</sup>. Часто используют несколько одновременно работающих пушек, в частности устанавливаемых по образующей камеры и генерирующих сходящиеся радиальные электронные пучки; применяют также пушки с кольцевыми катодными системами.

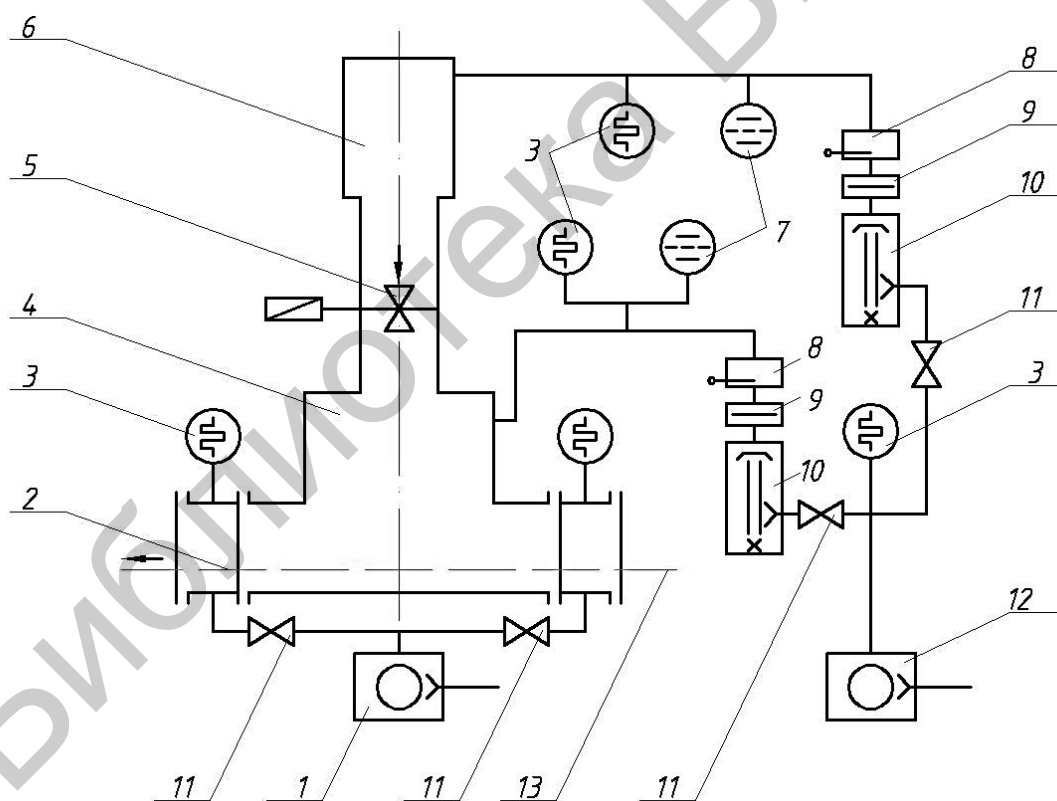
Оснащение пушек высоковольтным кабелем диаметром 30 мм с радиусом возможного изгиба менее 0,5 м позволяет использовать их как подвижную конструкцию внутри камеры для обработки неподвижно закрепленных изделий. При этом пушка может иметь индивидуальную откачку с отсечным вакуумным клапаном. Внутри крупногабаритных камер иногда создают относительно низкий вакуум (до 1–10 Па), а высокий вакуум поддерживают в самой пушке, при этом основной перепад давлений происходит в зоне лучепровода.

Освоен выпуск высоковольтных пушек с выводом луча в атмосферу. Такие системы позволяют проводить, например, сварку узлов крупногабаритных изделий с перемещением самой пушки вдоль зоны обработки. Область непосредственно вокруг зоны вакуумируют до 100–1000 Па с применением гофрированной складной камеры.

Для повышения производительности процессов в стационарных установках электронной обработки предусмотрены вакуумные шлюзы. В самом шлюзе непрерывно создается промежуточный вакуум, а изделия с помощью транспортных механизмов периодически перемещаются через них в высоковакуумную рабочую камеру без ее разгерметизации.

**Вакуумные системы.** Их основными узлами являются форвакуумные, бустерные и высоковакуумные диффузионные насосы. Схема вакуумной системы зависит от компоновочной структуры всей установки.

На рисунке 3.3 приведена схема вакуумной системы электронно-лучевой установки для сварки малогабаритных изделий с использованием шлюзовых устройств. Внутри пушки поддерживается вакуум  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Па, в рабочей камере –  $10^{-3}$  Па, а в шлюзах –  $10^{-1}$ – $1,0$  Па.



- 1 – форвакуумный насос шлюзов; 2 – шлюз; 3 – термопарные преобразователи; 4 – рабочая камера; 5 – клапан вакуумный между шлюзом и камерой; 6 – пушка электронная; 7 – преобразователи ионизационные; 8 – затвор; 9 – ловушка охлаждаемая; 10 – насос диффузионный; 11 – вентили вакуумные; 12 – насос форвакуумный; 13 – транспортирующий механизм

Рисунок 3.3 – Схема вакуумной системы электронно-лучевой установки

**Источники питания.** К ним относятся источники питания катодных узлов, высоковольтные выпрямители, источники модулирующего напряжения, блоки управления перемещением луча и объекта, системы контроля вакуума и зоны обработки.

Нестабилизированные высоковольтные выпрямители напряжений до 10,0–15,0 кВ, собранные по трехфазной мостовой схеме, используются только в плавильных установках и устройствах для разогрева, например, выпрямители марки ИВ-30/120 с номинальной мощностью 120 кВт. В большинстве электронно-лучевых установок высоковольтные выпрямители, источники питания фокусирующих и отклоняющих систем должны обладать высокой стабильностью выходных напряжений и токов. Такие выпрямители собраны по схеме Ларионова с герметизацией силовых блоков заливкой их трансформаторным маслом. Сглаживание пульсаций осуществляется LC-фильтрами. Для стабилизации напряжения используются магнитные усилители или электронные стабилизаторы.

Для двухэлектродных (диодных) пушек выпускаются выпрямители ИВ-60/4-1 и ИВ-60/4-2 (последний – для питания сразу двух пушек). Выпрямленное напряжение регулируется в пределах 0–72,0 кВ при номинальном рабочем 60,0 кВ, мощность источника – 4,0 кВт, напряжение накала – 12 В при силе тока 15 А. К этому же классу относятся выпрямители ИВ-25/4, ИВ-60/15.

В установках размерной обработки нестабильность ускоряющего напряжения не должна превышать 0,01 %. Сила анодного тока регулируется изменением потенциала на модулирующем электроде. Номинальное напряжение источника до 100,0 кВ при силе тока пучка до 10 мА. Схема модулятора позволяет выбрать необходимые параметры импульсного режима. В схемах таких выпрямителей, например типа электронно-лучевые установки размерной обработки, предусмотрена возможность сокращения времени переходных процессов, снижения пульсаций и исключения импульсных нестабильностей.

Для других установок могут быть использованы выпрямители ВС-50-50 с пределами регулировки напряжения от 0 до 50 кВ и максимальной силой тока в нагрузке 50 мА; пульсации выпрямленного напряжения не превышают  $\pm 5$  %. При колебаниях сетевого напряжения от плюс 5 до минус 15 % выходное напряжение меняется в них на  $\pm 2,5$  %.

Примером современной системы электропитания электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером является СПЭ-5.5-30-2.0 (ООО НПП «ИНСИТЕК» г. Томск) (рисунок 3.4). Это автоматизированный комплекс источников питания с компьютерным управлением, изготовленный с применением современной элементной базы, выполняющий следующие функции:

- питание разряда плазменного эмиттера;
- формирование ускоряющего напряжения;
- питание фокусирующей и отклоняющей системы пушки;
- стабилизация тока пучка;
- формирование технологических режимов обработки;

- отображение и сохранение текущих изменений параметров технологического процесса;
- сохранение параметров и режимов технологического процесса в графическом и текстовом формате с возможностью вывода на печать.

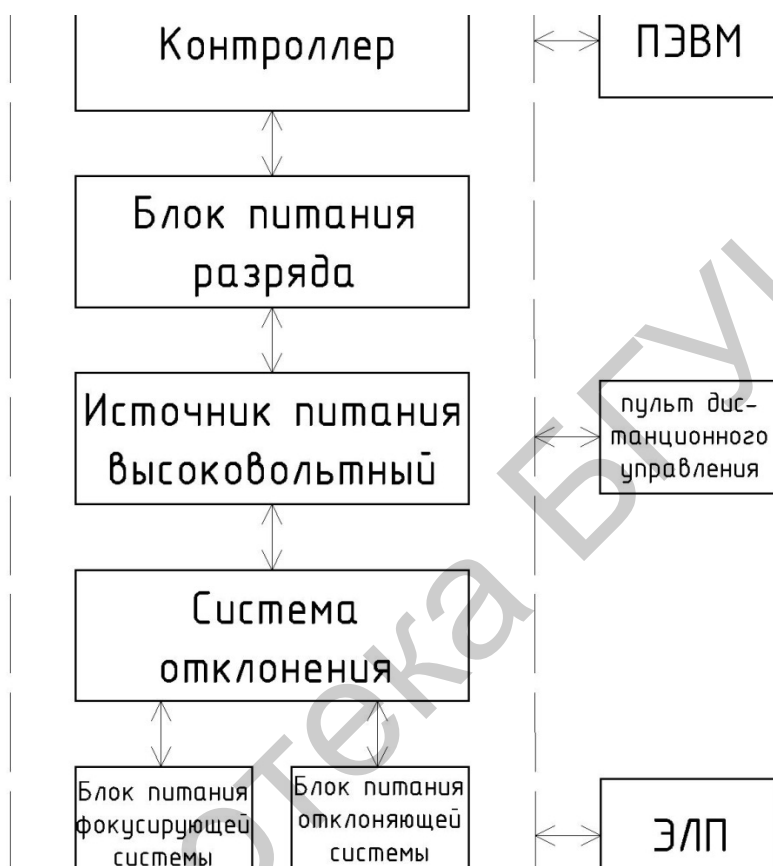


Рисунок 3.4 – Функциональная схема системы электропитания СПЭ-5.5-30-2.0

Конфигурация системы позволяет дополнительно включать источник питания потенциального смещения, а вместо источника питания разряда плазменного эмиттера – источник питания накала термокатодной электронной пушки. Дополнительно к системе подключается модуль сканирования обрабатываемой поверхности по вторичным электронам, контроллеры движения, управления манипуляторами, вакуумной системы и электромеханических устройств.

Детектирование потока вторичных электронов дает возможность получить изображение поверхности детали, произвести распознавание сварного шва, навести луч в заданную точку и автоматизировать процесс.

Программное обеспечение позволяет расширять функциональность, реализовывать различные алгоритмы и режимы управления. Управление системой электропитания производится оператором через интерфейс, размещенный на экране сенсорного монитора, и дистанционный пульт.

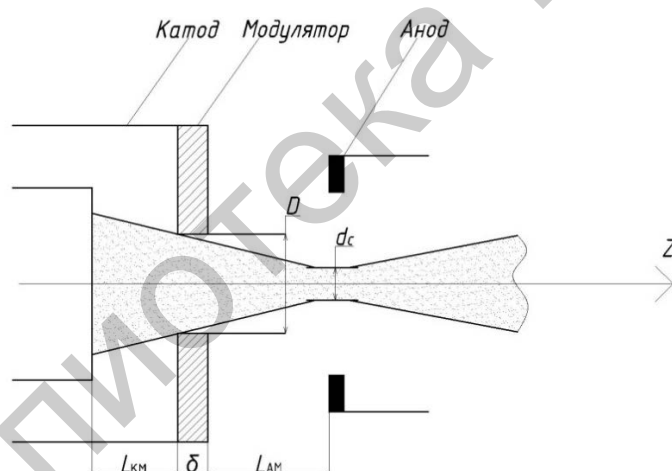
## 4 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК

### 4.1 Расчет слаботочных низкоперевансных пушек

В электронно-лучевых приборах используются слаботочные электронные пушки. Основным назначением электронной пушки (прожектора) является формирование минимального сечения (кроссовера), являющегося объектом для электронной линзы, которая отображает его на мишени. При разработке электронно-оптической системы следует учитывать следующие соображения:

- 1) возможность плавной регулировки тока луча;
- 2) простоту технологии изготовления прожектора и других узлов;
- 3) для изготовления системы должны применяться вакуумные материалы;
- 4) экономичность в эксплуатации и долговечность прожектора.

Поскольку переванс таких систем небольшой и не превышает  $10^{-9} \text{ A/V}^{\frac{3}{2}}$ , то для фокусировки луча используется простая параксиальная оптика, элементы которой состоят из диафрагм и цилиндров. Наибольшее распространение в электронно-лучевых трубках получила оптическая система, состоящая из двух линз (рисунок 4.1). Первой линзой обычно является иммерсионный объектив, состоящий из катода, модулятора и анода.



$D$  – диаметр отверстия в модуляторе;  $\delta$  – толщина отверстия в модуляторе;

$L_{KM}$  – расстояние катод – модулятор;  $d_c$  – диаметр кроссовера;

$L_{AM}$  – расстояние анод – модулятор

Рисунок 4.1 – Схема низкоперевансной электронной пушки

В качестве катода для неразборных систем целесообразно применять оксидный катод, имеющий низкую рабочую температуру при наибольшей величине удельной эмиссии.

Плотность тока эмиссии оксидного катода равна  $0,2\text{--}0,5 \text{ A/cm}^2$  в зависимости от температуры. Управляющий электрод (модулятор) представляет собой цилиндр, прикрытый диском с круглым отверстием. На него подается отрицательный по отношению к катоду потенциал и он служит для регулировки тока

луча. Ускоряющий электрод (анод) выполняется обычно в виде цилиндра, а со стороны модулятора он закрыт диском с отверстием. На анод подается ускоряющее напряжение. Через отверстие в модуляторе поле анода провисает сильнее на оси и убывает в направлении радиуса. То есть катод нагружен неравномерно и наибольший отбор тока происходит с его центрального участка (рисунок 4.2). При изменении потенциала модулятора ток катода меняется, как и в триоде, за счет изменения пространственного заряда у катода, а также за счет изменения площади поверхности катода, у которой создается положительный градиент поля (см. рисунок 4.2). Следовательно, изменение потенциала модулятора сопровождается более быстрым изменением тока, отбираемого с катода, чем изменение потенциала сетки в триоде.

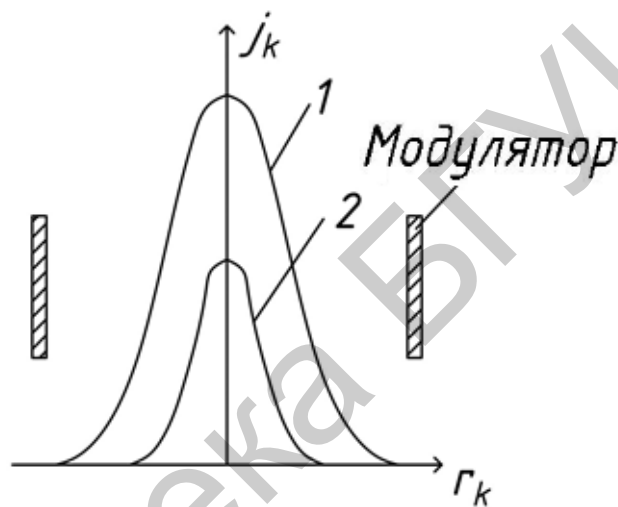


График 1:  $U_M = 0$ ; график 2:  $U_M < 0$

Рисунок 4.2 – Распределение тока по поверхности катода

Диаметр рабочей поверхности катода определяется по формуле

$$d_K = \frac{(U_3 - U_M) \cdot D}{U_3}, \quad (4.1)$$

где  $U_3$  – запирающее напряжение;

$U_M$  – напряжение модулятора;

$D$  – диаметр отверстия модулятора.

Ток с катода можно выразить следующим соотношением:

$$I_K = 3 \cdot (U_3 - U_M)^{\frac{7}{2}} \cdot (U_3)^{-2}. \quad (4.2)$$

Средняя плотность тока катода

$$J_K = \frac{12 \cdot (U_3 - U_M)^{\frac{3}{2}}}{\pi \cdot D^2}. \quad (4.3)$$

При конструировании электронного прожектора следует учитывать, что для сохранения приемлемого срока службы катода пиковую нагрузку катода не следует выбирать больше 10 мА/мм<sup>2</sup>.

Одним из наиболее существенных параметров электронного прожектора является запирающее напряжение  $U_3$ , при котором ток катода равен нулю. Зависимость  $U_3$  от геометрических параметров пушки выражается формулой

$$U_3 = 0,034 \cdot \frac{(D - \delta)^2}{L_{\text{КМ}} \cdot L_{\text{АМ}}} \cdot U_a, \quad (4.4)$$

где  $D$  – диаметр отверстия в модуляторе;

$U_a$  – ускоряющее напряжение.

Угол расхождения пучка в скрещении:

$$\sin \alpha = 0,3 \cdot \frac{D}{(L_{\text{АМ}})^{0,75}} \cdot \frac{(U_3 - U_M)}{U_3}. \quad (4.5)$$

Радиус скрещенния можно найти из следующего уравнения:

$$0,1 = \exp\left(\frac{e \cdot U_a \cdot r_c^2 \cdot \sin \alpha}{k \cdot T \cdot r_K^2}\right), \quad (4.6)$$

где  $U_a$  – потенциал анода (ускоряющего электрода);

$r_c$  – радиус скрещенния;

$\sin \alpha$  – угол расхождения пучка в скрещении;

$T$  – температура катода;

$k$  – постоянная Больцмана;

$r_K$  – радиус катода.

Для электронно-оптической системы, состоящей из иммерсионного объектива и магнитной или электростатической проекционной линзы (рисунок 4.3), диаметр пятна на мишени определяется по уравнению Лагранжа – Гельмгольца:

$$r_{\text{П}} = r_c \cdot \frac{b \cdot \sqrt{U_a}}{a \cdot \sqrt{U_M}}, \quad (4.7)$$

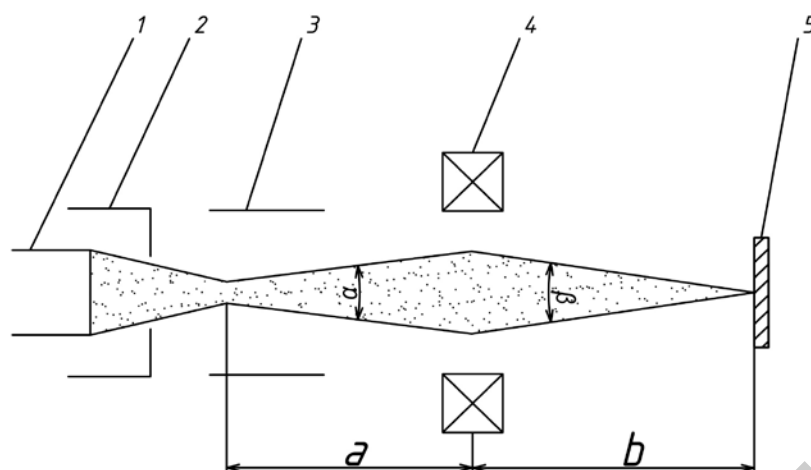
где  $r_{\text{П}}$  – радиус пятна на мишени;

$b$  – расстояние от линзы до мишени;

$a$  – расстояние от кроссовера до линзы;

$U_M$  – потенциал мишени второго анода.





1 – катод; 2 – модулятор; 3 – анод; 4 – линза; 5 – мишень

Рисунок 4.3 – Двухлинзовая электронно-оптическая система

## 4.2 Расчет высокоперевансных пушек

В электронных пушках технологического назначения в основном используются интенсивные пучки. Мерой их интенсивности является переванс  $P$ :

$$P = \frac{I}{U_a^2}, \quad (4.8)$$

где  $I$  – ток пучка.

В обычных электронно-лучевых приборах переванс пучков не превышает  $10^{-9} \text{ A/V}^2$  и действие пространственного заряда не учитывается. Если  $P$  больше  $10^{-8} \text{ A/V}^2$ , то его необходимо учитывать, т. к. происходит расширение пучка в пространстве дрейфа, падение потенциала в пучке, ограничение тока пучка.

Формирование сильноточных пучков возможно при компенсации кулоновского расталкивания внешними электрическими или магнитными полями.

Для формирования интенсивных пучков наибольшее распространение получили пушки Пирса. В пушках Пирса с параллельным пучком электрическое поле, созданное в пространстве, окружающем пучок, должно удовлетворять двум условиям:

1) распределение потенциала вдоль границы изменяется по закону

$$U(z) = U_a \cdot \left(\frac{z}{d}\right)^{\frac{4}{3}}; \quad (4.9)$$

2) напряженность поля, нормальная к границе пучка, должна быть равна нулю, т. е. должны отсутствовать силы, приводящие к расширению пучка:

$$\frac{dU}{dz} = 0. \quad (4.10)$$

Эти условия обеспечиваются подбором формы электродов пушки.

На рисунке 4.4 приведено распределение потенциалов в пушке Пирса, обеспечивающее формирование аксиально-симметричного пучка.

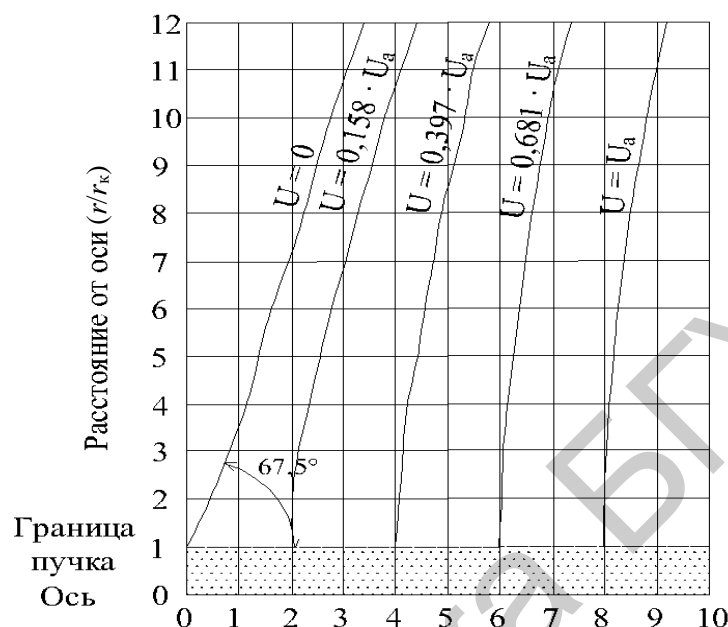


Рисунок 4.4 – Распределение потенциалов в пушке Пирса

Нулевая эквипотенциаль  $U = 0$  представляет собой поверхность, подходящую к границе пучка под углом  $67,5^\circ$ , а все остальные эквипотенциали – под прямым углом. На основании картины поля легко построить пушку, создающую параллельный пучок. Такая пушка содержит плоский катод, катодный (фокусирующий) электрод, имеющий форму нулевой эквипотенциали и анод. Форма анодного электрода соответствует эквипотенциали  $U_a$ . Чтобы пучок мог пройти за пределы анода, в нем имеется круглое отверстие.

Для пушки диодного типа соотношение между током катода, напряжением анода и расстоянием между катодом и анодом имеет следующий вид:

$$I_K = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^{\frac{3}{2}}}{d^2} \cdot S_K; \quad (4.11)$$

где  $I_K$  – ток катода;

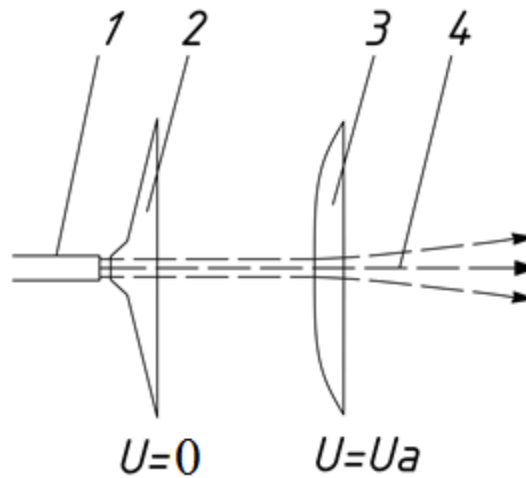
$U_a$  – напряжение анода;

$d$  – расстояние анод – катод;

$S_K$  – площадь катода.

Расстояние между катодом и анодом также рассчитывается по закону степени  $\frac{3}{2}$ .

На рисунке 4.5 показана система электродов пушки Пирса для формирования цилиндрического пучка.



1 – катод; 2 – катодный электрод; 3 – анод; 4 – пучок

Рисунок 4.5 – Система электродов, создающая параллельный пучок электронов

Наличие отверстия в аноде пушки приводит к расхождению пучка за анодом. Полагая, что напряженность поля за анодом равна нулю, можно определить фокусное расстояние:

$$f = -3 \cdot d. \quad (4.12)$$

Угол расхождения пучка за анодом определяется из выражения

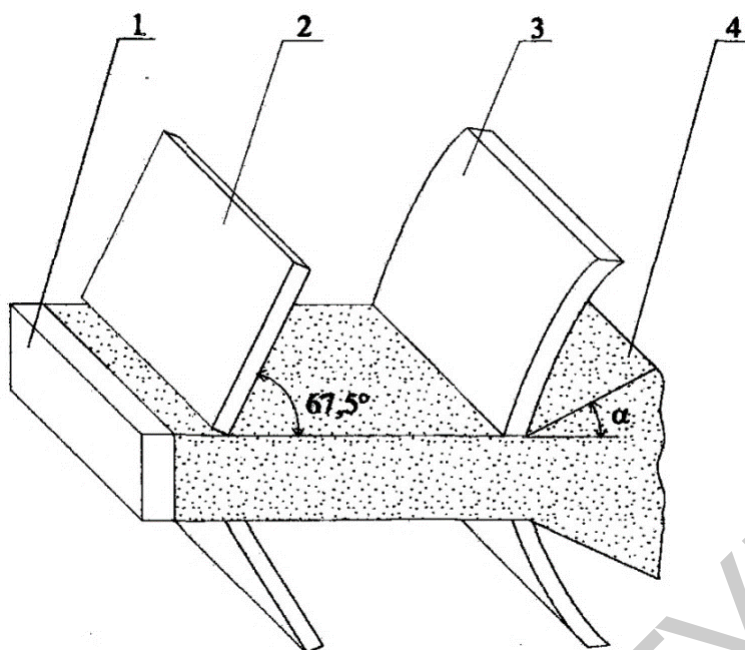
$$\operatorname{tg}(\gamma) = \frac{r_A}{3 \cdot d}, \quad (4.13)$$

где  $r_A$  – радиус анодного отверстия.

При выборе катода пушки необходимо учитывать то, что в установках разборного типа катод неоднократно сообщается с атмосферой и, следовательно, он не должен терять эмиссионные свойства. Поэтому в таких установках применяются катоды из чистых металлов и боридлантановые катоды.

Рабочая площадь катода рассчитывается по заданному току катода.

Наряду с пушкой, создающей параллельный цилиндрический пучок электронов, в электронно-лучевых устройствах применяются пушки с ленточным пучком. Параллельный ленточный пучок можно сформировать системой Пирса с плоским прямоугольным катодом. Фокусирующий электрод состоит из двух пластин, примыкающих к длинной стороне катода, образующих угол  $67,5^\circ$  с нормалью к поверхности катода. Анод также состоит из двух изогнутых по форме эквипотенциальных пластин, расположенных друг от друга на расстоянии, равном толщине пучка. Эскиз электродов пушки для формирования параллельного ленточного пучка представлен на рисунке 4.6.



1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 – анод; 4 – пучок

Рисунок 4.6 – Схема пушки Пирса для формирования ленточного пучка

Для управления током луча в пушках Пирса фокусирующий электрод изолируют от катода, и на него подается управляющее напряжение. Однако в пушках с большим первеансом управление током луча при помощи фокусирующего электрода малоэффективно. Большая эффективность управления током пучка достигается в пушках со специальными управляющими электродами.

Для формирования сходящегося аксиально-симметричного пучка используется пушка Пирса сферического типа. Сходящийся пучок в такой пушке получается вырезанием конической поверхностью части электронного потока, заполняющего пространство между концентрическими сферами. Следовательно, катод пушки имеет вид участка сферы радиусом  $r_K$ , а анод – части сферы с радиусом  $r_A$ . Форма фокусирующего электрода соответствует нулевой эквипотенциали, которая подходит к границе пучка под углом  $67,5^\circ$ . Анодная эквипотенциаль подходит к границе пучка под прямым углом.

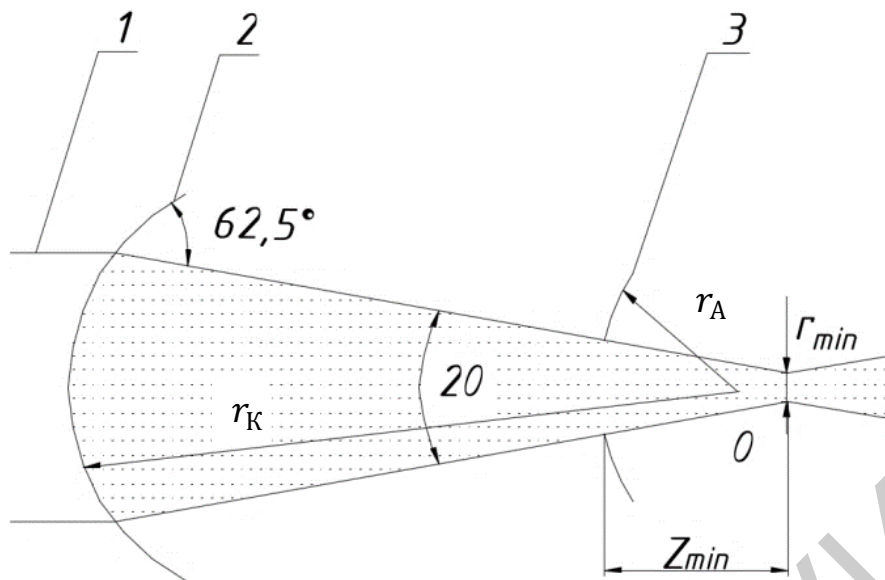
На рисунке 4.7 показана конфигурация электродов пушки сферического типа. Ток анода такой пушки определяется законом степени  $\frac{3}{2}$ :

$$I_a = 29,35 \cdot 10^{-6} \cdot 1/[-\alpha(R_a)]^2 \cdot (1 - \cos(\theta))/2 \cdot (U_a)^{\frac{3}{2}}, \quad (4.14)$$

где  $(-\alpha)^2$  – функция отношения радиусов катодной и анодной сфер;

$R_a = r_K/r_A$ , где  $r_K$  – радиус катодной сферы;  $r_A$  – радиус анодной сферы;

$2 \cdot \theta$  – угол сходимости пучка.



1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 – анод

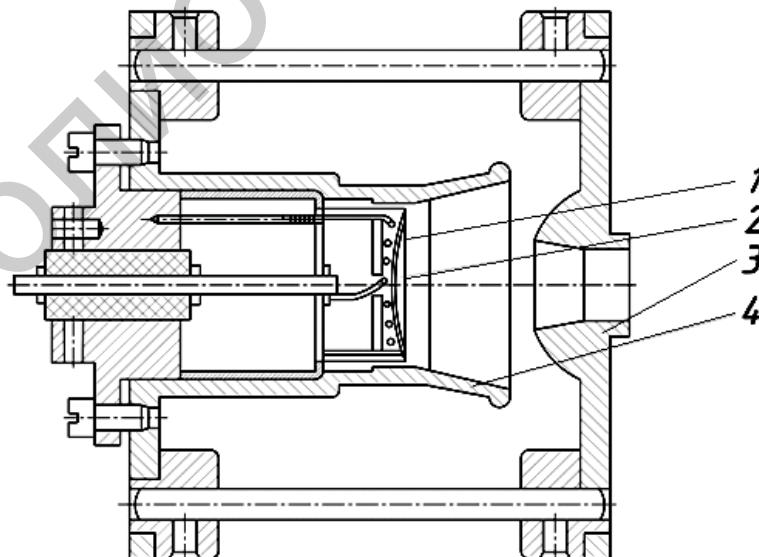
Рисунок 4.7 – Пушка Пирса сферического типа

Оптимальными являются следующие соотношения:

$$\frac{r_K}{r_A} = 2,2; \quad z_{\min} = 1,05 \cdot r_K; \quad z_{\min} = 0,43 \cdot r_A; \quad \theta = 21 \cdot \sqrt{P}.$$

По ним рассчитывается геометрии пушки на заданные параметры пучка.

На рисунке 4.8 представлена схема пушки Пирса для формирования сходящегося пучка.



1 – катод; 2 – подогреватель; 3 – фокусирующий электрод; 4 – анод

Рисунок 4.8 – Экспериментальная пушка Пирса:  $U_a = 50$  кВ;  $K = 0,5$  мкА/В<sup>3/2</sup>

## 4.3 Катоды

Катод служит источником электронов. По способу возбуждения их делят на два класса: термоэлектродные катоды, эмитирующие электроны при нагревании, и холодные катоды, не имеющие специального подогрева (в том числе автоэлектронные, фотокатоды, вторичные эмиссионные и т. д.).

Катоды характеризуются следующими основными параметрами:

1 Удельная эмиссия (плотность тока эмиссии) – величина тока эмиссии с единицы поверхности катода. Зависит от температуры и работы выхода материала катода.

2 Удельная мощность катода  $P_H$  – мощность, затрачиваемая на нагрев  $1 \text{ см}^2$  поверхности катода. Характеризует мощность потребления катода.

3 Эффективность катода  $H$  (А/Вт) – ток электронной эмиссии  $I_E$  на один ватт мощности, затрачиваемой на разогрев катода. Это наиболее важный параметр катода, который оценивает его экономичность.

4 Рабочая температура,  $T_p$  – температура, при которой достигается требуемый ток эмиссии. По этому параметру термокатоды делят на низкотемпературные ( $T_p$  равна 1000–1100 К) и высокотемпературные ( $T_p$  равна 2400–2600 К).

5 Долговечность катода – время работы катода при нормальных условиях эксплуатации, в течение которого катод сохраняет свои свойства (для технологических катодов время работы составляет 100–5400 ч).

Отличительными особенностями технологических катодов являются низкая долговечность, частая сменяемость и высокая ремонтпригодность.

Катод является узлом, работающим в исключительно неблагоприятных условиях. Во многих случаях длительность непрерывной работы технологического оборудования определяется временем его службы. Выделение газов с поверхности обрабатываемого изделия, работа в плохом вакууме приводят к отравлению катода, усиливается его бомбардировка ионами, образующимися в камере, что ведет к перегреву и разрушению катода.

Стремление получить высокие плотности тока эмиссии вынуждает нагревать катод до предельно высоких температур, при которых нагреваемые поверхности начинают деформироваться и испаряться. Поэтому для изготовления катодов используют тугоплавкие металлы и сплавы с различными добавками.

### 4.3.1 Расчет идеального катода прямого накала

Расчет прямонакального катода состоит из двух этапов:

1) расчет идеального катода, т. е. такого катода, у которого температура по всей длине имеет одно и то же значение;

2) расчет реального катода с учетом поправок на охлаждение в местах крепления держателя.

Для упрощения расчетов вводится понятие идеального единичного катода, под которым понимают цилиндр длиной  $l_{K1} = 1 \text{ см}$  и диаметром  $d_{K1} = 1 \text{ см}$ .

Сопротивление катода в нагретом состоянии определяется выражением

$$R_K = \frac{4\rho l_K}{\pi d_K^2}. \quad (4.15)$$

Если  $l_{K1} = d_{K1} = 1$  см, то сопротивление единичного катода

$$R_1 = \frac{4\rho}{\pi}, \quad (4.16)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала катода при данной температуре.

Тогда

$$R_K = R_1 \cdot l_K / d_K^2. \quad (4.17)$$

При протекании по катоду тока накала в нем будет выделяться мощность, равная

$$P_K = \eta \cdot \pi \cdot d_K \cdot l_K, \quad (4.18)$$

где  $\eta$  – удельная мощность излучения материала катода.

Мощность идеального единичного катода:

$$P_1 = \eta \cdot \pi \quad \text{и} \quad P_K = P_1 \cdot d_K \cdot l_K. \quad (4.19)$$

Учитывая, что  $P_H = I_H \cdot U_H = I_K^2 \cdot R_H = I_K^2 \cdot R_1 \cdot l_K / d_K^2$ , получаем

$$P_1 \cdot d_K \cdot l_K = I_K^2 \cdot R_1 \cdot \frac{l_K}{d_K^2}.$$

Откуда

$$I_K = \sqrt{\frac{P_1 \cdot d_K^3}{R_1}} = \sqrt{I_1^2 \cdot d_K^3} = I_1 \cdot d_K^{\frac{3}{2}}, \quad (4.20)$$

$$U_K = \frac{P_K}{I_K} = \frac{P_1 \cdot d_K \cdot l_K}{I_1 \cdot d_K^{\frac{3}{2}}} = \frac{U_1 \cdot l_K}{d_K^{\frac{1}{2}}}. \quad (4.21)$$

$I_1$  и  $U_1$  – ток и напряжение единичного катода, являются только функцией температуры катода. Ток эмиссии идеального катода определяется выражением

$$I_{\text{э}} = j_{\text{э}} \cdot \pi \cdot d_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}} = I_{\text{э}1} \cdot d_{\text{к}} \cdot l_{\text{к}}, \quad (4.22)$$

где  $I_{\text{э}}$  – плотность тока эмиссии единичного катода ( $I_{\text{э}} = j_{\text{э}} \cdot \pi$ );

$j_{\text{э}}$  – плотность тока эмиссии материала катода.

Долговечность катода можно подсчитать по эмпирической формуле

$$D_{\text{к}} = 2,64 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_{\text{к}}}{M_1}, \quad (4.23)$$

где  $M_1$  – скорость испарения материала с поверхности единичного катода, м/с ( $M_1 = m \cdot \pi$ ).

Параметры единичного катода  $I_1, U_1, P_1, R_1, j_{\text{э}}, M_1$  приводятся в таблицах [16–18].

### 4.3.2 Расчет реального прямонакального катода

Реальный катод имеет неравномерное распределение температуры по длине (рисунок 4.9). Участки катода, которые расположены у держателей, имеют температуру меньше, чем средняя часть катода из-за отвода тепла держателями. Рабочая температура соответствует  $T_{\text{max}}$ .

При расчете реального катода из-за наличия охлаждения концов вводят поправки на уменьшение эмиссии катода и напряжения накала.

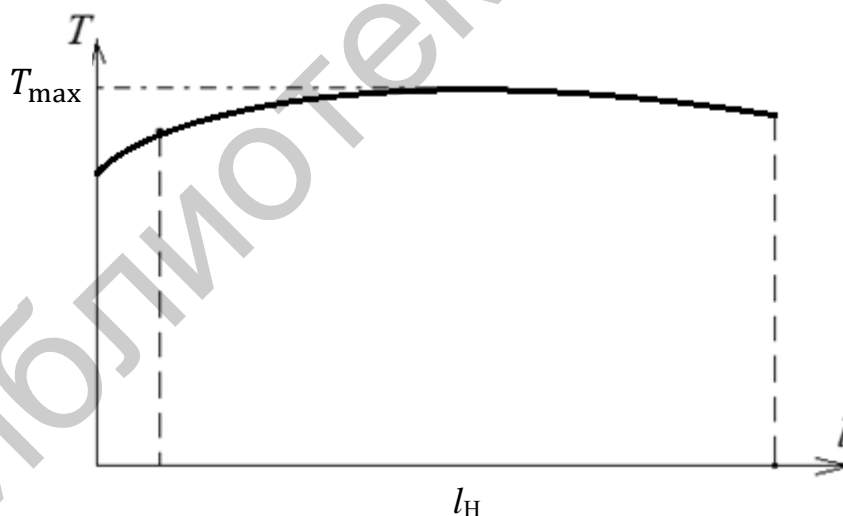


Рисунок 4.9 – Распределение температуры по длине реального катода

С учетом поправок напряжения накала ток эмиссии определяют из следующих выражений:

$$U_{\text{н}} = U_1 \cdot \left( \frac{l_{\text{к}}}{\sqrt{d_{\text{к}}}} - n \cdot \Delta U_{\text{н}} \right), \quad (4.24)$$



$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э}1} \cdot d_{\text{К}} \cdot l_{\text{К}} \cdot f_{\text{Э}}, \quad (4.25)$$

где  $n$  – число охлажденных концов;

$\Delta U_{\text{Н}}$  – поправка на напряжение накала;

$f_{\text{Э}}$  – коэффициент, определяющий поправку за счет охлажденных концов:

$$f_{\text{Э}} = \frac{(U_{\text{Н}} + n \cdot \Delta U_{\text{Н}} - n \cdot \Delta U_{\text{Н.Э}})}{U_{\text{Н}} + n \cdot \Delta U_{\text{Н}}}, \quad (4.26)$$

где  $\Delta U_{\text{Н.Э}}$  – поправка на эмиссию.

Число охлаждаемых концов определяется исходя из конструктивных соображений. Например, для петлевого V-образного катода (рисунок 4.10)  $n = 3$ .

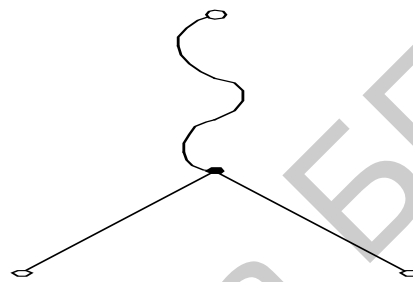


Рисунок 4.10 – Петлевой V-образный катод

Поправка  $\Delta U_{\text{Н}}$  на напряжение накала и напряжение эмиссии  $\Delta U_{\text{Н.Э}}$  приводятся в таблицах конструкторских норм.

### 4.3.3 Расчет катода косвенного накала

Исходными данными для расчета катода косвенного накала являются  $I$ ,  $j_{\text{Э}}$ ,  $P'_{\text{Н}}$  и  $T_{\text{нагр}}$ .

По заданному току эмиссии  $I$  и допустимой плотности тока термоэлектронной эмиссии определяют активную площадь поверхности катода:

$$S_{\text{К}} = \frac{I}{j_{\text{Э}}}, \quad (4.27)$$

где  $j_{\text{Э}}$  – табличная величина.

Зная величину  $S_{\text{К}}$ , определяют геометрические размеры и конструируют катод. При расчете катода необходимо немного завышать  $S_{\text{К}}$  для учета отвода тепла изоляторами и соединителями катода, а также износ катода. Также необходимо учитывать механическую прочность катода, проводить расчет на изгиб при повышенных температурах. Затем определяют мощность накала по удельной мощности накала:

$$P_H = P'_H \cdot S_K, \quad (4.28)$$

$$I_H = \frac{P_H}{U_H}, \quad (4.29)$$

где  $P_H$  – удельная мощность накала (приводится в конструкторских нормах).

#### 4.3.4 Приближенный расчет подогревателей

Исходными данными для приближенного расчета подогревателей являются  $I_H$  и  $U_H$ , удельное сопротивление и удельная мощность рассеивания проволокой подогревателя. Температуру подогревателя находят из выражения  $T_{\Pi} = T_K + (300-500)K$  ( $T_K$  – значение температуры катода).

Длина и диаметр проволоки определяются следующими выражениями:

$$l_{\Pi} = \frac{U_H \cdot I_H}{\pi \cdot P'_H \cdot d_{\Pi}}, \quad (4.30)$$

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{\Pi}}{\pi^2 \cdot P'_{\Pi}} I_H^2}, \quad (4.31)$$

где  $P'_{\Pi}$  – удельная мощность нити подогревателя в зависимости от температуры нагрева (приводится в справочниках для различных материалов).

Число витков спирали

$$n = \frac{\sqrt{(l_{\Pi}/\alpha \cdot L)^2 - 1}}{\pi \cdot (D + d_{\Pi})}, \quad (4.32)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный 1 для обычной и 2 для бифилярной спирали;

$L$  – длина спирали;

$D$  – диаметр керна, на который навивается спираль.

Часть справочного материала приведена в таблицах 4.1–4.3.

Таблица 4.1 – Параметры единичного катода из вольфрама

$T, K$	$I, A,$ $cm^{-3/2}$	$U_1,$ $V/cm^{-1/2}$	$P,$ $Вт \cdot cm^{-2}$	$P_1,$ $Ом \cdot cm$	$I_э,$ $A/cm^2$	$M_1,$ $г/(cm^2 \cdot c)$
2300	1319	0,1124	148,2	$85,22 \cdot 10^{-6}$	0,041	$7,9 \cdot 10^{-11}$
2400	1422	0,1275	181,2	$89,65 \cdot 10^{-6}$	0,116	$4,3 \cdot 10^{-10}$
2500	1526	0,1436	219,3	$94,13 \cdot 10^{-6}$	0,298	$2,03 \cdot 10^{-9}$
2600	1632	0,1611	263,0	$98,66 \cdot 10^{-6}$	0,716	$8,4 \cdot 10^{-9}$

Таблица 4.2 – Поправка на эмиссию

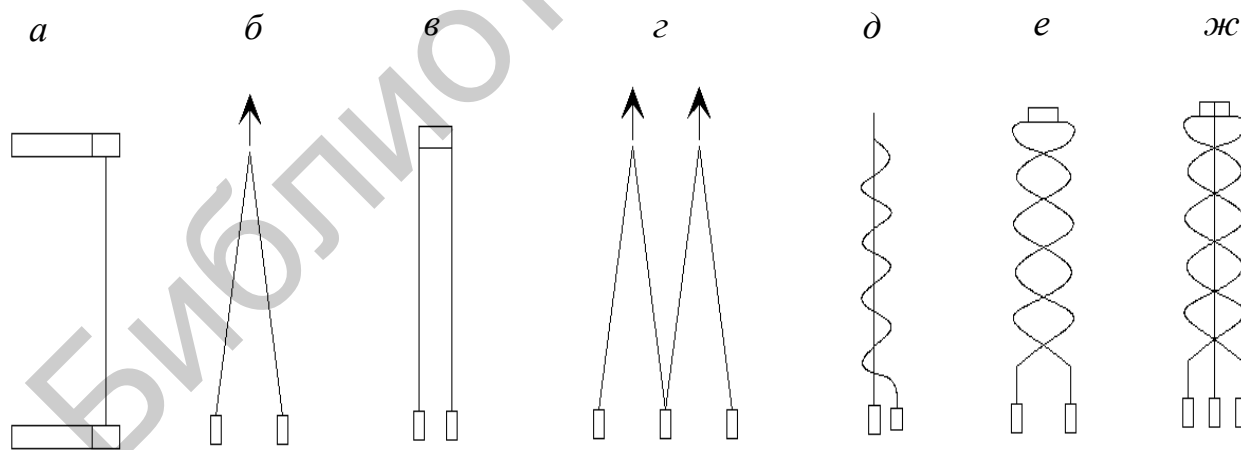
$T_{K_{max}}, K$	2300	2400	2500	2600	2700	2800
$\Delta U_H, B$	0,225	0,237	0,248	0,259	0,269	0,280
$\Delta U_{H.Э}, B$	0,855	0,840	0,930	0,930	0,930	0,930

Таблица 4.3 – Параметры подогревателей в зависимости от температуры

Материал подогревателя	Температура катода					
	1300 К		1400 К		1500 К	
	$\rho'_{п} \cdot 10^{-6},$ Ом · см	$\rho'_{п},$ Вт/см <sup>2</sup>	$\rho'_{п} \cdot 10^{-6},$ Ом · см	$\rho'_{п},$ Вт/см <sup>2</sup>	$\rho'_{п} \cdot 10^{-6},$ Ом · см	$\rho'_{п},$ Вт/см <sup>2</sup>
Вольфрам ВА-1	34,1	2,57	37,2	3,83	40,3	5,5
Сплав МВ-50	35,7	3,8	38,7	5,2	41,0	6,9
Сплав ВР-20	56,3	–	59,1	3,56	61,8	–

### 4.3.5 Конструкции катодов

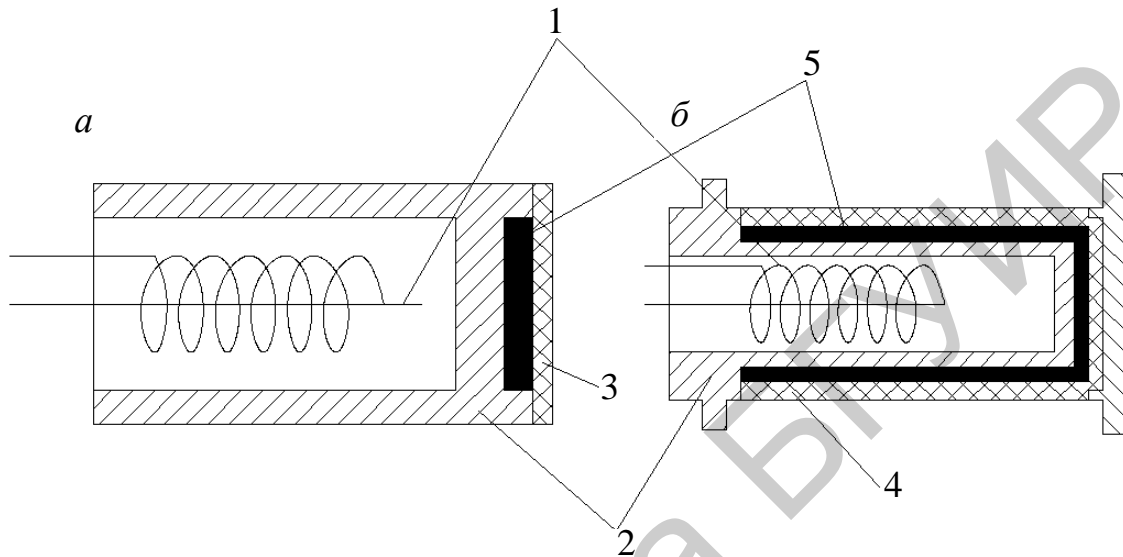
**Прямокальные катоды** – обычно проволочные катоды с толщиной проволоки от долей миллиметров до нескольких миллиметров. Для увеличения эмитирующей поверхности им могут придавать конструкцию спиралей или лент. Прямокальные катоды характеризуются высокой экономичностью и малым временем разогрева. Недостатком прямокальных катодов является их **неэквипотенциальность**, т. е. неравномерное распределение потенциала по длине катода из-за падения напряжения, создаваемого протекающим током. Примеры конструкций катодов прямого накала приведены на рисунке 4.11.



*a* – проволочный прямой; *б* – проволочный петлевой V-образный;  
*в* – ленточный прямой; *г* – проволочный петлевой W-образный;  
*д* – проволочный спиральный; *е* – проволочный двухспиральный;  
*ж* – проволочный двухспиральный усиленный

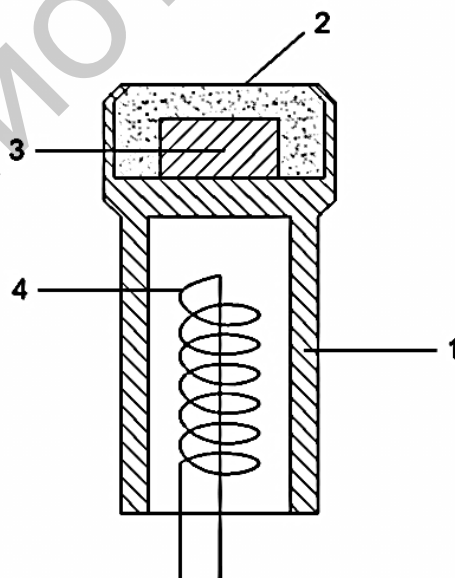
Рисунок 4.11 – Конструкции прямокальных катодов

**Подогревные катоды** имеют одинаковый потенциал по всей поверхности, т. е. являются эквипотенциальными, имеют большую массу и, следовательно, тепловую инерцию. Конфигурация катода (ленточный, круглый, точечный) определяется геометрией электронного пучка. К недостаткам относят большее время разогрева и меньшую эффективность, чем у прямонакальных катодов. Примеры конструкций подогревных катодов (катодов косвенного накала) приведены на рисунках 4.12–4.15.



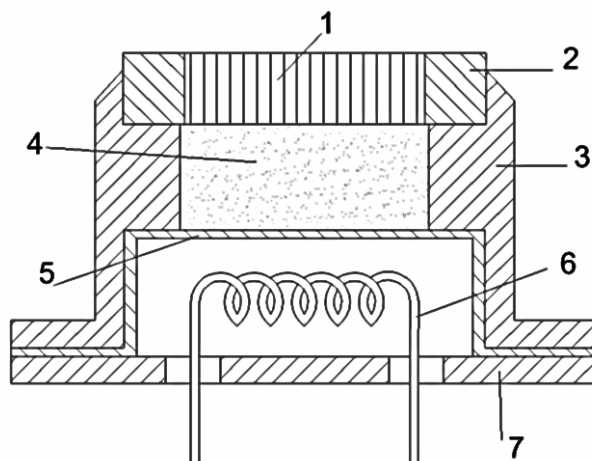
*a* – с торцевой излучающей поверхностью; *б* – с цилиндрической излучающей поверхностью; 1 – подогреватель; 2 – молибденовый экранирующий корпус; 3, 4 – детали защиты из пористого вольфрама; 5 – имитирующий материал

Рисунок 4.12 – Конструкции *L*-катада



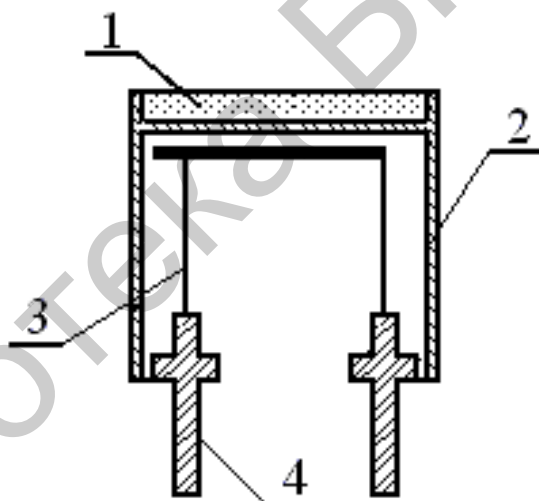
1 – корпус молибденовый; 2 – вольфрамовая губка; 3 – полость с активным веществом (барием); 4 – подогреватель

Рисунок 4.13 – Металлокапиллярный бариево-вольфрамовый катод



1 – вольфрамовая губка; 2 – обечайка вольфрамовой защиты; 3 – корпус;  
 4 – полость с активным веществом (барием); 5 – молибденовый экран;  
 6 – подогреватель; 7 – основание

Рисунок 4.14 – Пучковый бариево-вольфрамовый металлопористый катод



1 – рабочая поверхность катода ( $\text{LaB}_6$ ); 2 – молибденовый корпус;  
 3 – подогреватель; 4 – держатель

Рисунок 4.15 – Схема гексанборидного катода

## 5 СИСТЕМЫ ФОКУСИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

В электронно-лучевых устройствах в основном используются электронные оптические системы с прямолинейной осью, а фокусировку осуществляют электрические и магнитные поля, обладающие симметрией вращения к этой оси. Фокусирующие элементы без осевой симметрии (например, квадрупольные элементы) используются для коррекции формы поперечного сечения пучка.

Электронными или магнитными линзами называют определенное соотношение электродов и катушек, предназначенных для фокусировки.

### 5.1 Электронные линзы

#### 5.1.1 Линза в виде диафрагмы с круглым отверстием

На рисунке 5.1, *a* показана фокусирующая система, содержащая два плоских электрода  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , к которым приложены потенциалы  $U_1$  и  $U_2$ . Между ними расположен электрод  $D$  с потенциалом  $U_d$ . Электрод  $D$  имеет круглое отверстие, диаметр которого много меньше расстояния между электродами. В этом случае поле отличается от однородного лишь в небольшой области, прилегающей к отверстию диафрагмы.

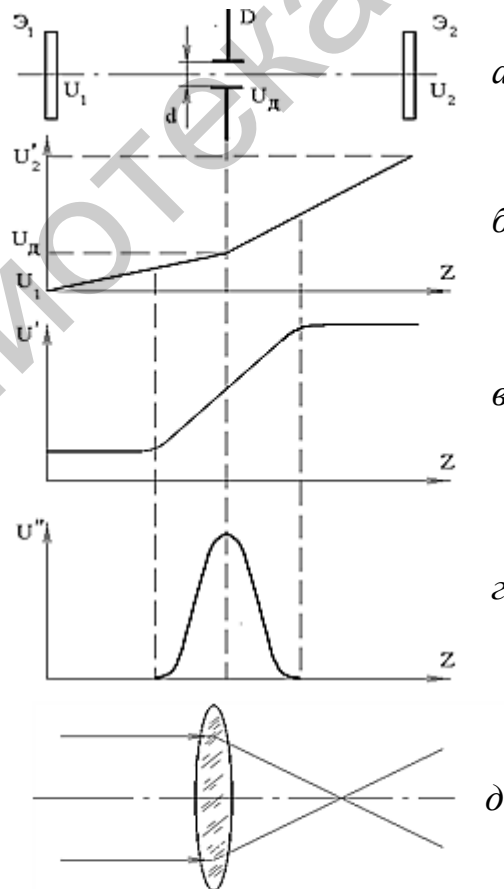


Рисунок 5.1 – Фокусирующая система с двумя плоскими электродами

На рисунке 5.1, б приведен случай, когда потенциал на электроде  $D$  создаст меньшую напряженность поля в промежутке  $\mathcal{E}_1-D$  по сравнению с напряженностью поля в промежутке  $D-\mathcal{E}_2$ . При движении электроны в области диафрагмы проходят участок неоднородного электромагнитного поля (рисунок 5.1, в) и попадают в область с большой напряженностью электромагнитного поля. Из рисунка. 5.1, г видно, что вторая производная в области диафрагмы имеет положительный знак. Силовые линии в области диафрагмы вогнуты в сторону электрода  $\mathcal{E}_1$ . В результате электроны меняют свою траекторию и приближаются к оси  $Z$ , т. е. диафрагма в данном случае оказывает собирающее действие (рисунок 5.1, д).

Когда напряженность поля на участке  $\mathcal{E}_1-D$  больше, чем на участке  $D-\mathcal{E}_2$ , вторая производная напряженности поля будет отрицательной, а силовые линии при подходе к  $D$  со стороны электрода  $\mathcal{E}_1$  будут вогнуты в сторону электрода  $\mathcal{E}_2$ . Электроны искривляют свои траектории и рассеиваются. При таком распределении потенциалов система будет рассеивающей. Так как по обе стороны линзы лежат области с разными потенциалами, то она может служить не только для фокусировки, но и для ускорения или замедления электронов.

Для фокусного расстояния пространства объектов справедлива формула

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{U_a}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U''(z)}{\sqrt{U(z)}} dz. \quad (5.1)$$

Фокусное расстояние пространства изображений рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{U_b}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U''(z)}{\sqrt{U(z)}} dz. \quad (5.2)$$

Если считать линзу, образованную диафрагмой, тонкой, а потенциал пространства на оси  $Z$  в области диафрагмы постоянным, то фокусное расстояние линзы можно определить по формуле

$$\frac{1}{f_d} = \frac{E_1 - E_2}{4 \cdot U_d}, \quad (5.3)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – напряженность поля слева и справа от диафрагмы соответственно;  $U_d$  – потенциал диафрагмы.

Для более точного определения  $f_d$  электрическое поле на оси плоской диафрагмы считают равным

$$U_z = U_d + \frac{r}{\pi} \cdot (E_1 - E_2) \left( 1 + \frac{z}{r} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{z}{r} \right) \right) - \frac{1}{2} (E_1 + E_2), \quad (5.4)$$

где  $r$  – радиус отверстия диафрагмы;

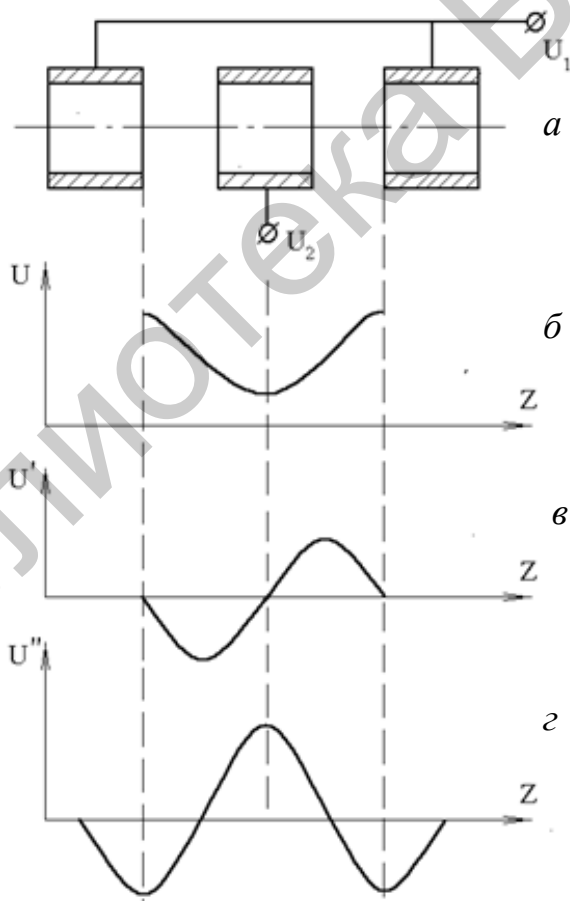
$z$  – расстояние на оси от плоскости диафрагмы.

Потенциал в центре отверстия отличается от потенциала электрода и равен

$$U_0 = U_d + \frac{r}{\pi} \cdot (E_1 - E_2). \quad (5.5)$$

### 5.1.2 Одиночная линза

Одиночная линза образуется комбинацией из трех электродов, крайние из которых имеют одинаковый потенциал (рисунок 5.2). Комбинация электродов может быть самой разнообразной (два цилиндра и диафрагма, три цилиндра, диафрагма и два цилиндра и т. д.). Равенство потенциалов на крайних электродах обуславливает неизменность энергии электронного пучка.



$a$  – схема одиночной линзы;  $b$  – распределение электрического поля;  
 $v$  – первая производная поля;  $z$  – вторая производная поля

Рисунок 5.2 – Одиночная линза



В рассматриваемой линзе различают три области, две из которых оказывают одинаковое действие, а третья противоположное. При любом потенциале на среднем электроде линза оказывает собирающее действие, поскольку электроны проходят собирающую область с меньшими скоростями, чем рассеивающую область.

Для случая когда расстояние между крайними и средним электродами больше радиусов отверстий крайних  $r_1$  и среднего  $r_2$  электродов, потенциал в центре линзы будет равен

$$U(0) = U_2 + \frac{(U_1 - U_2)}{1 + \frac{z_0}{r_2} \operatorname{arctg}\left(\frac{z_0}{r_2}\right)}, \quad (5.6)$$

где  $z_0$  – координата центра линзы.

В центре крайних электродов

$$U(z_0) = U_1 - \frac{(U_1 - U_2) \cdot \frac{r_1}{(2 \cdot r_2)}}{\frac{z_0}{r_2} \operatorname{arctg}\left(\frac{z_0}{r_2}\right)}, \quad (5.7)$$

где  $U_1$  – потенциал крайних электродов;

$U_2$  – потенциал среднего электрода;

$r_2$  – радиус отверстия среднего электрода.

Оптическая сила линзы отражается соотношением

$$M = \frac{U_0}{U_{z_0}}. \quad (5.8)$$

Фокусное расстояние такой линзы зависит от  $M$ . При  $M < 1$

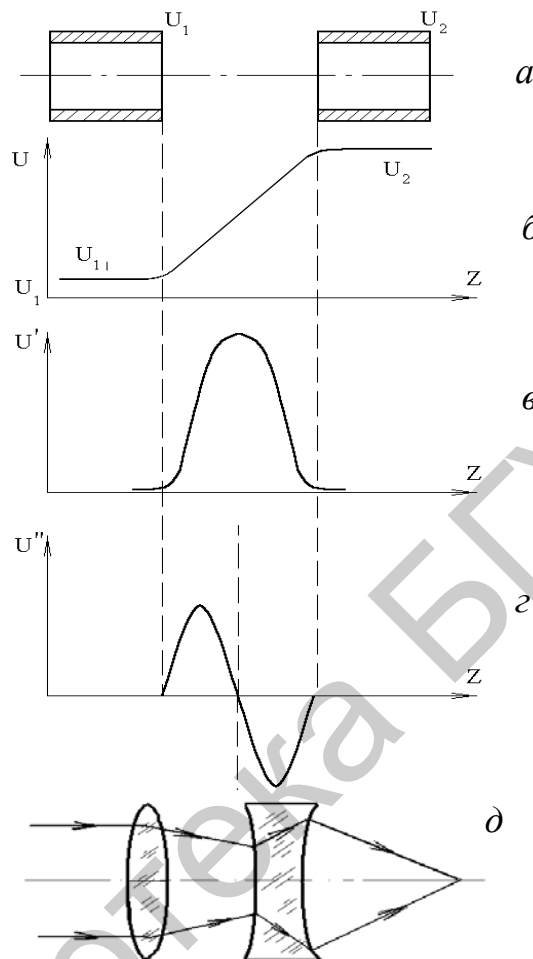
$$f = \frac{8}{3} \cdot \frac{M}{(1 - M)^2} \cdot z_0. \quad (5.9)$$

### 5.1.3 Иммерсионные линзы

Иммерсионные линзы (рисунок 5.3) образуются комбинацией различных электродов (две диафрагмы, два цилиндра, цилиндр и диафрагма и т. д.), к которым приложены разные потенциалы. Несмотря на разнообразие конструкций, иммерсионные линзы имеют общие свойства: они всегда собирающие, несимметричные, изменяют энергию электронного пучка.

На рисунке 5.3, а изображена линза, образованная двумя цилиндрами одинакового диаметра. При движении в линзе, когда  $U_1 < U_2$ , электроны увеличивают свою энергию, т. к. попадают в область с более высоким потенциа-

лом (рисунок 5.3, в). Первый участок электроны проходят с меньшей скоростью, чем второй, где линза оказывает рассеивающее действие. В результате общее действие линзы будет собирающим.



*a* – схема линзы; *б* – распределения поля в линзе; *в* – первая производная поля; *г* – вторая производная поля; *д* – эквивалентная оптическая схема

Рисунок 5.3 – Линза, образованная двумя цилиндрами одинакового диаметра

Если  $U_1 > U_2$ , то энергия электронов уменьшится, но линза останется собирающей.

### 5.1.4 Иммерсионный объектив

Иммерсионный объектив представляет собой комбинацию иммерсионной линзы с источником электронов – катодом. На рисунке 5.4 показана схема фокусирующего иммерсионного объектива, состоящего из катода, модулятора и анода, а также отражено распределение потенциала вдоль оси симметрии и оптический эквивалент этой линзы.

Видно, что поле в области модулятора будет фокусировать электронный пучок, а поле в области анода оказывать рассеивающее действие. Общее действие иммерсионного объектива будет собирающим, т. к. в первой области скорости электронов меньше скоростей электронов, подходящих к рассеивающей области. Оптическую силу иммерсионного объектива можно менять, изменяя соотношения потенциалов анода и модулятора.

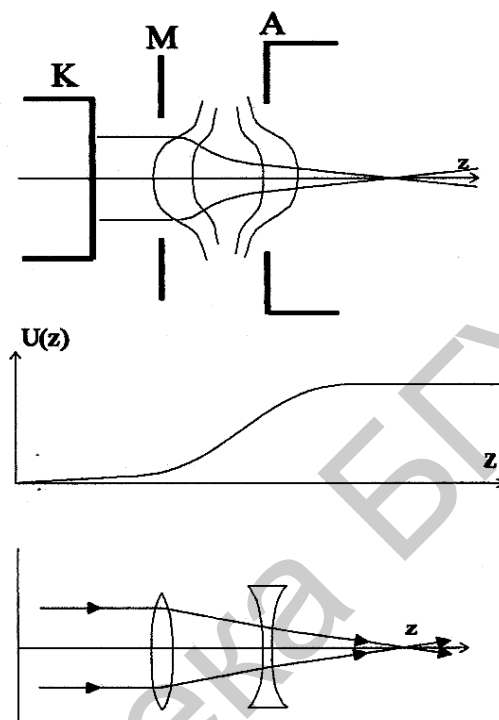


Рисунок 5.4 – Иммерсионный объектив

Иммерсионный объектив используется и для управления величиной тока пучка электронов.

**Преимущества** электронных линз:

- простота конструкции;
- отсутствуют дополнительные потери энергии, т. к. электронные пучки обычно не замыкаются на электроды линз;
- имеется возможность использовать электроды линз как ускоряющие, т. е. изменять энергию электронов;
- фокусировка не зависит от массы заряженной частицы, поскольку аналог коэффициента преломления пропорционален  $U^{\frac{1}{2}}$ . Поэтому электронные линзы оказывают одинаковое действие на электроны и на однозарядные ионы. То есть эти закономерности справедливы и для ионно-лучевой обработки;
- имеется возможность корректировки фокусных расстояний путем изменения электрического потенциала.

**Недостатки** электронных линз:

- высокие электрические потенциалы, возможна ионизация остаточных газов продуктов обработки и электрический пробой;

- относительно сложные конструкции, обеспечивающие электрическую изоляцию;
- качество фокусировки очень сильно зависит от стабильности питающих напряжений;
- aberrации больше, чем в электромагнитных линзах.

## 5.2 Магнитные линзы

Фокусировка в магнитных линзах осуществляется за счет действия силы Лоренца, которая возникает только при наличии движущихся электронов. Для получения уменьшенного источника электронов применяют короткие магнитные линзы. Магнитное поле таких катушек сосредоточено в узкой области. На расстоянии, соизмеримым с диаметром катушки, индукция магнитного поля близка к нулю. По этой причине при фокусном расстоянии, превышающем размеры поля, линзу можно считать короткой (тонкой).

Оптическая сила слабой и короткой линзы (рисунок 5.5) определяется значением магнитной индукции на оси линзы  $B$  и энергией электронов:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{e}{8 \cdot m \cdot U \cdot a} \int_{-\infty}^{+\infty} B^2 dz, \quad (5.10)$$

где  $f$  – фокусное расстояние;

$b$  и  $a$  – соответственно передний и задний отрезки линзы;

$m$  – масса фокусируемой частицы.

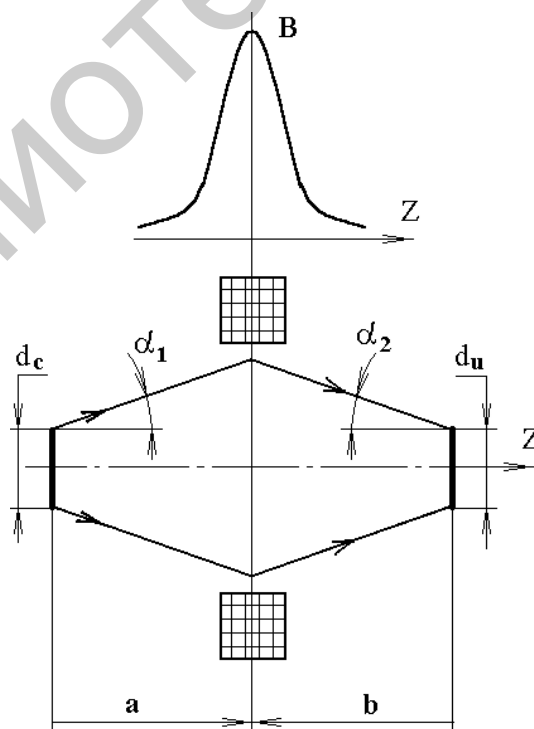


Рисунок 5.5 – Схема магнитной линзы

Масштаб изображения  $M$  (уменьшения или увеличения) – величина, равная отношению диаметра электронного пучка (или другого характерного размера) в фокальной плоскости линзы к диаметру (или другому характерному размеру) в плоскости скрещивания:

$$M = \frac{d_u}{d_c}. \quad (5.11)$$

Масштаб изображения и параметры тонкой линзы связаны соотношением

$$M = \frac{b - f}{f} = \frac{f}{a - f}. \quad (5.12)$$

Фокусное расстояние тонкой (короткой) магнитной линзы без сердечника можно определить из соотношения

$$f = 98 \cdot \frac{U_a \cdot r_{cp}}{(n \cdot I_\phi)^2}, \quad (5.13)$$

где  $U_a$  – ускоряющее напряжение, В;

$r_{cp}$  – средний радиус катушки, см;

$n$  – число витков катушки;

$I_\phi$  – сила тока в катушке, А.

При прохождении через магнитную линзу электронный пучок поворачивается на некоторый угол. Направление угла поворота определяется по правилу буравчика. Величина угла поворота изображения в радианах в такой линзе определяется из соотношения

$$\varphi = 10,7 \cdot \frac{I_\phi \cdot n}{\sqrt{U_a}}. \quad (5.14)$$

В линзах с большим увеличением фокусное расстояние должно быть коротким. Создание короткофокусных (сильных) магнитных линз при помощи катушки без ферромагнитной оболочки затруднительно, т. к. для увеличения оптической силы необходимо увеличивать число ампер-витков. Это возможно только при увеличении размеров (среднего радиуса) катушки и, следовательно, сопровождается уменьшением ее оптической силы. Кроме того, при значительном увеличении числа ампер-витков и заметной напряженности поля вдоль оси, траектории электронов могут пересечь ось в еще достаточно сильной области поля, т. е. фокус окажется внутри линзы (рисунок 5.6).

Расходящийся пучок будет снова фокусироваться оставшейся частью поля и за линзой получится второй фокус или второе изображение. При очень

большой величине магнитной индукции второе изображение также может оказаться внутри линзы, а за линзой будет третье изображение и т. д.

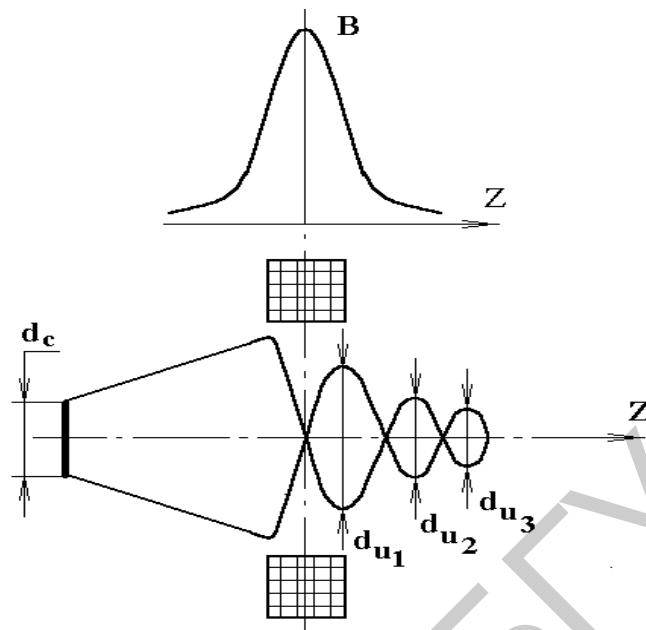


Рисунок 5.6 – Схема получения многократного изображения

Использование линз в таком режиме нецелесообразно: второе  $f$  будет значительно меньше первого, поскольку для фокусировки берется лишь часть поля. Кроме того, второе и последующее изображения будут значительно хуже первого из-за усиления aberrаций.

Увеличение оптической силы линзы при тех же ампер-витках может быть достигнуто путем сжатия поля вдоль оси  $Z$ . Согласно закону магнитного поля

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B_0 \cdot z \cdot dZ = U \cdot I_{\phi}, \quad (5.15)$$

т. е. площади, ограниченные кривыми 1 и 2 на рисунке 5.7, равны.

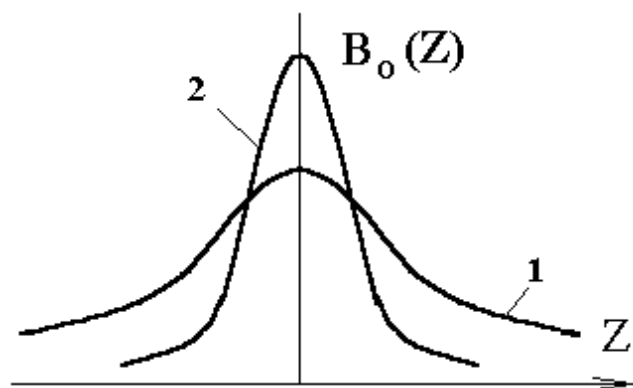


Рисунок 5.7 – Распределение магнитного поля линзы

В то же время оптическая сила магнитной линзы пропорциональна  $B_0^2$  и, следовательно, при распределении поля по кривой 2 линза будет более сильной. Таким образом, уменьшение протяженности поля вдоль оси  $z$  и увеличение  $B_0$  приводит к росту магнитной силы линзы. Практически короткофокусные линзы получают, помещая фокусирующую катушку в оболочку из ферромагнитного материала с магнитным зазором. Уменьшая ширину зазора  $S$  в магнитопроводе, можно «сжать» кривую распределения магнитного поля и увеличить оптическую силу линзы. Концентрация магнитного поля сопровождается сильным увеличением его напряженности. На рисунке 5.8 показано влияние магнитного экрана на форму и величину магнитного поля. Распределение магнитной индукции на оси такой линзы при отсутствии насыщения материала экрана (броневое сердечник) и при условии  $0,5 < d/S < 2$  может быть рассчитано по формуле

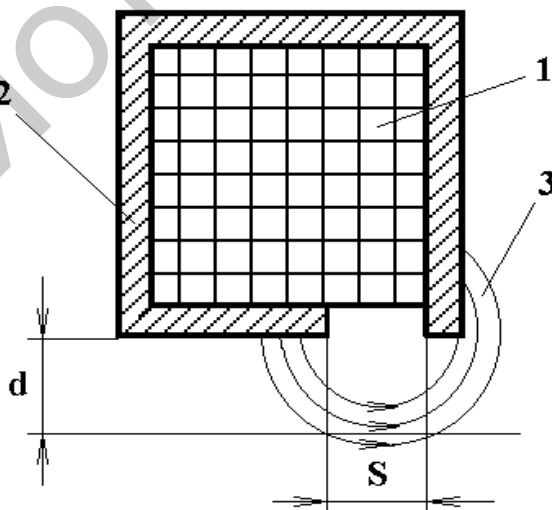
$$B = \frac{1,257 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot S} \left[ \frac{Z + 0,5 \cdot S}{\sqrt{\left(\frac{d}{3}\right)^2 + (Z + 0,5 \cdot S)^2}} - \frac{Z - 0,5 \cdot S}{\sqrt{\left(\frac{d}{3}\right)^2 + (Z - 0,5 \cdot S)^2}} \right], \quad (5.16)$$

где  $B$  – индукция, Тл;

$d, S, Z$  – линейные размеры, см.

Если  $S/d < 1$ , при расчетах может быть использовано соотношение

$$B = B_0 \cdot \left[ 1 + \left(\frac{Z}{d}\right)^2 \right]. \quad (5.17)$$



1 – обмотка; 2 – броневой сердечник; 3 – силовые линии

Рисунок 5.8 – Короткофокусная магнитная линза

Оптическая сила такой линзы равна

$$\frac{1}{f} = \frac{\pi \cdot k^2}{2 \cdot d}, \quad (5.18)$$

где

$$k^2 = \frac{e^2 \cdot B_0^2 \cdot d^2}{8 \cdot m \cdot (e \cdot U_a)}, \quad (5.19)$$

где  $e$  – заряд фокусируемой частицы;

$m$  – масса частицы.

Для электрона

$$k^2 = 2,2 \cdot \frac{10^6 \cdot B_0^2 \cdot d^2}{U_a}, \quad (5.20)$$

а  $B_0$  – максимум индукции, который равен

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot I_L}{n \cdot D}, \quad (5.21)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума;

$I_L$  – величина тока в обмотке линзы;

$D$  – геометрический параметр, минимальное фокусное расстояние (см), которое определяется по формуле

$$D = 0,48 \cdot (S^2 + 0,45 \cdot d^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.22)$$

Изображение сечения скрещивания пучка (кроссовер), сформированное генератором электронов (электронная пушка), с помощью магнитной линзы переносится в масштабе плоскости изображения. Для идеальной безаберрационной линзы диаметр пучка в фокальной плоскости рассчитывается из соотношения

$$d_u = M \cdot d_c = \frac{d_k}{\alpha_1} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{e \cdot U_a}}, \quad (5.23)$$

где  $d_k$  – характерный размер;

$\alpha_1$  – угол расхождения пучка.

Плотность тока луча в фокальной плоскости равна

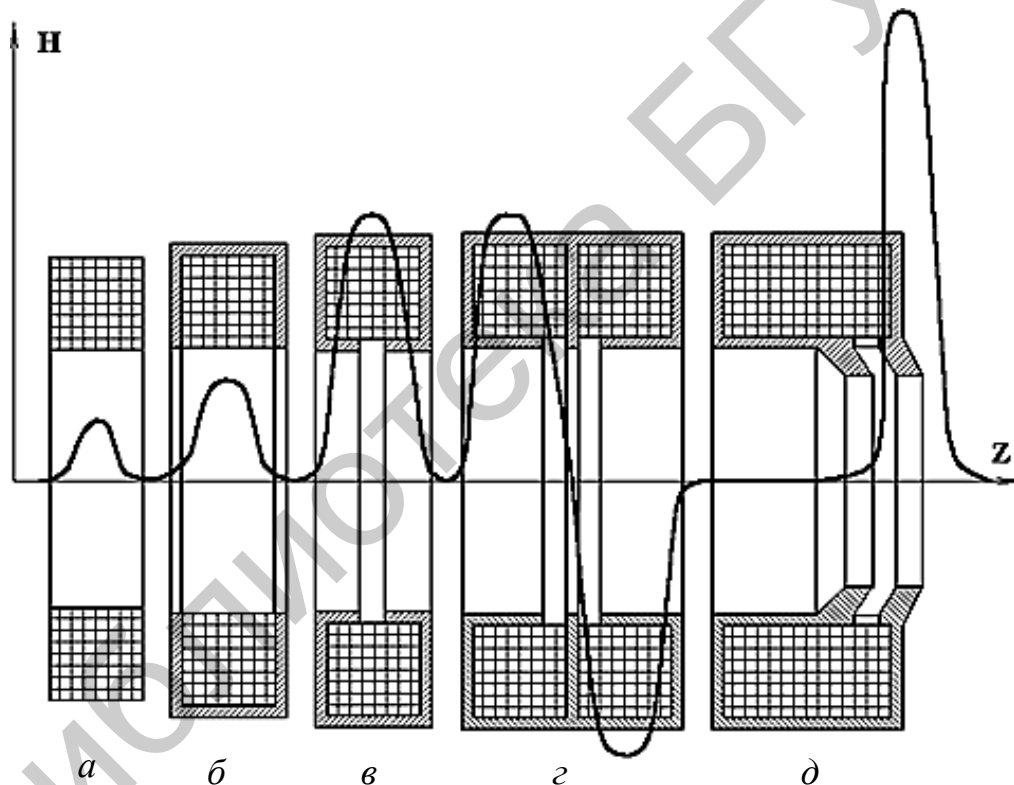
$$j_n = \frac{1}{M^2} \cdot j_{\text{э}} \cdot \frac{e \cdot U_a \cdot \alpha_2^2}{k \cdot T}, \quad (5.24)$$

где  $\alpha_2$  – угол схождения пучка в плоскости изображения.



На рисунке 5.9, *з* представлено распределение поля в так называемой двойной магнитной линзе, образованной двумя катушками, заключенными в ферромагнитную оболочку с перегородкой, токи в катушках имеют противоположные направления. В этом случае оптические силы линзы, образованные каждой катушкой, складываются, величина  $1/f$  пропорциональна  $B_0^2$ , т. е. не зависит от напряжения магнитной индукции. В то же время углы поворота изображений вычитаются, т. к.  $\psi \sim B_0$  и при изменении напряженности магнитного поля (тока в катушке) на обратное угол поворота также меняет знак. Таким образом, двойная магнитная линза имеет вдвое большую оптическую силу и не поворачивает изображение. Такие магнитные линзы применяются, когда нежелателен поворот изображения. Еще больший эффект получается при применении специальных полюсных наконечников, помещаемых внутрь магнитопровода.

Линзы с полюсными наконечниками (рисунок 5.9, *д*) имеют фокусное расстояние всего несколько миллиметров.

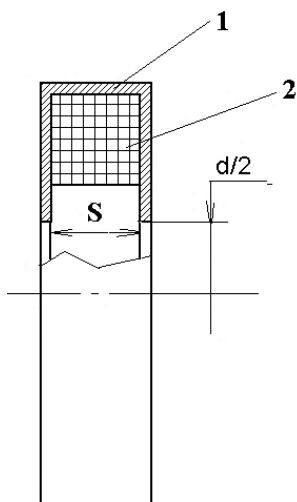


*а* – линза без экрана; *б* и *в* – линзы с магнитными экранами;  
*г* – двойная панцирная линза в броневом сердечнике;  
*д* – панцирная магнитная линза с полюсными наконечниками

Рисунок 5.9 – Распределение магнитного поля в магнитных линзах

Определяющим оптические параметры линзы, заключенной в магнитную оболочку (рисунок 5.10), при заданных ампер-витках и энергии электронов, является отношение  $S/d$ . Инженерная оценка фокусного расстояния при условии  $0,2 < S/d < 2,0$  может быть проведена по формуле

$$f \cong 50 \cdot (d \cdot S)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{U}{(n \cdot I_{\text{л}})^2}. \quad (5.25)$$



1 – ферримагнитная оболочка; 2 – обмотка

Рисунок 5.10 – Магнитная линза, заключенная в магнитную оболочку

### 5.3 Аберрации фокусирующих систем

При фокусировке электронов в электрическом или магнитном поле из-за непараллельности траекторий электронов и различия в скорости появляются искажения изображения, так называемые геометрические и хроматические аберрации. Рассмотрим качественно происхождение и характер аберраций.

#### 5.3.1 Сферическая аберрация

Сферическая аберрация возникает из-за разных условий фокусировки электронов, движущихся под разными углами. В этом случае в плоскости изображения возникает пятно рассеяния сферической аберрации, имеющей форму круга, радиус которого равен

$$\delta r_{\text{сф}} = C_{\text{сф}} \cdot \alpha^{-3}, \quad (5.26)$$

где  $C_{\text{сф}}$  – коэффициент сферической аберрации;

$\alpha$  – угол крайней траектории пучка с осью Z.

Коэффициент сферической аберрации для короткой магнитной линзы можно определить по формуле

$$C_{\text{сф}} = \frac{a \cdot b}{d} \cdot \left[ k_1 \cdot \left( \frac{n^2 I^2}{U} + k_2 \frac{n^2 I^2}{U} \right) \right], \quad (5.27)$$

где  $a$  и  $b$  – расстояния от плоскости предмета и плоскости изображения до магнитной линзы, см;

$d$  – диаметр магнитопровода, см;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от соотношения  $S/d$ ;

$U$  – энергия электронов, В.

Коэффициенты сферической aberrации по вышеперечисленным формулам определяются с точностью 15–20 %. Значение коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  в зависимости от соотношения  $S/d$  приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Коэффициенты для расчета сферической aberrации

$S/d$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$k_1 \cdot 10$	6,4	6,2	4,8	3,8	3,0	2,5	2,1
$k_2 \cdot 10$	5,8	4,2	3,2	2,4	1,8	1,4	1,2

Для магнитных линз с сердечником коэффициент сферической aberrации можно определить из соотношения

$$C_{\text{сф}} = \frac{5 \cdot f^3}{(s + d)^2} = 3125 \cdot f \left[ \frac{U}{(n \cdot l)^2} \right]^2. \quad (5.28)$$

Эти формулы относятся к линзе, работающей в режиме бесконечного увеличения, и мы получаем  $C_{\text{сф} \infty}$ . С учетом конечной величины уменьшения

$$C_{\text{сф}} = C_{\text{сф} \infty} \cdot \frac{M'^4}{(1 - M')^4}, \quad (5.29)$$

где  $M'$  – коэффициент уменьшения линзы.

Сферическую aberrацию можно уменьшить, уменьшая величину апертуры линзы, т. е. ограничивая ширину электронного пучка, создающего изображение. Если ширина пучка в области линзы меньше апертуры линзы, величина сферической aberrации определяется апертурой пучка.

### 5.3.2 Хроматические aberrации

Хроматические aberrации возникают вследствие того, что в зависимости от скоростей электроны по-разному преломляются в фокусирующей системе. В результате наблюдается кружок размытия изображения с радиусом, равным

$$\delta r_{\text{хр}} = C_{\text{хр}} \cdot \frac{\Delta U}{U}, \quad (5.30)$$

где  $C_{\text{хр}}$  – коэффициент хроматической aberrации;

$\Delta U$  – флуктуация напряжения;

$U$  – ускоряющее напряжение.

Для коротких линз

$$\delta r_{\text{xp}} = 2f \frac{\Delta U}{U} \alpha_2. \quad (5.31)$$

С уменьшением диаметра пучка требования к стабильности ускоряющего напряжения возрастают, т. к. величина радиуса размытия вследствие хроматической аберрации становится соизмеримой с диаметром пучка. Для пучка меньше 1 мкм нестабильность  $\Delta U/U \leq 10^{-4}$ .

### 5.3.3 Влияние пространственного заряда

Влияние пространственного заряда на размытие пятна электронного луча можно определить из выражения

$$d_3 = \alpha_2 f \cdot \exp(-\alpha_2^2 \cdot \sigma), \quad (5.32)$$

где

$$\sigma = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{U^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{m}{2e}} \approx 3,04 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{U^{\frac{3}{2}}}. \quad (5.33)$$

С учетом аберраций диаметр электронного пучка в плоскости изображения определяется как

$$d_{\Sigma}^2 = d_u^2 + d_{\text{сф}}^2 + d_{\text{xp}}^2 + d_3^2. \quad (5.34)$$

**Преимущества** коротких магнитных линз с броневыми сердечниками:

- высокая экономичность благодаря высокой концентрации магнитного поля в зазоре;
- возможность получения большого увеличения;
- возможность корректировки поля изменением величины и формы тока (при переменном токе);
- отсутствие высоких электрических потенциалов;
- меньшая критичность к величине питающего напряжения.

**Недостатки** коротких магнитных линз с броневыми сердечниками:

- сложность конструирования и сборки;
- невозможность ускорения заряженных частиц, изменения их энергии;
- значительные габариты, вес и стоимость.

## 5.4 Конструирование «коротких» осесимметричных фокусирующих систем

Прежде чем приступить к конструкторскому и электрическому расчету фокусирующей системы, необходимо определить ее положение на оптической оси. При выборе положения фокусирующей системы исходят из основного требования – получить минимальный размер фокусного пятна в плоскости изображения. Для выполнения этого требования фокусирующую систему надо располагать ближе к плоскости изображения. Однако при этом в случае наличия отклоняющей системы увеличивается диаметр пучка и величина aberrаций. При удалении фокусирующей системы от плоскости изображения улучшается равномерность фокусировки по всему полю изображения, но падает разрешающая способность в центре площади сканирования луча. При выборе положения фокусирующей системы нужно учитывать взаимное влияние полей отклоняющей системы и фокусирующей системы, которое вызывает дополнительные aberrации. Для этого надо увеличивать  $f$  и расстояние между оптической системой и фокусирующей системой. Для уменьшения протяженности магнитного поля нужно использовать систему с магнитопроводом. При этом желательно уменьшить ширину зазора  $S$ . Практически выбирают  $S = d/2$ . Это обеспечивает минимальную величину сферической aberrации и наилучшие энергетические параметры.

Таким образом, приближение и удаление фокусирующей системы к площади изображения уменьшает разрешающую способность оптической системы либо в центре, либо на краях плоскости обработки. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо провести оценочные расчеты величины сферической aberrации в центре и на краях для получения оптимального фокусного расстояния. Ориентировочно оптимальным считается расстояние 10–15 мм между фокусирующей системой и оптической системой.

После определения  $f$  рассчитывают число ампер-витков системы. В зависимости от условий работы и схемы питания фокусирующей катушки выбирают величину тока  $I_\phi$  и находят необходимое число витков катушки.

Для работы фокусирующей системы без нагрева допустимая плотность тока выбирается в пределах 2–3 А/мм<sup>2</sup>. Исходя из этого выбирается диаметр провода катушки.

Далее выбирают тип катушки (рядовую, шахматную или в навал) и рассчитывают коэффициент укладки катушки – отношение сечения всех проводников к общему сечению каркаса. Для круглого провода коэффициент укладки катушки равен

$$K_y = \frac{\pi d_u^2 n}{4h(D_2 - D_1)}, \quad (5.35)$$

где  $d_u$  – диаметр провода с изоляцией;

$n$  – число витков;

$h$  – ширина каркаса;

$D_1$  и  $D_2$  – внутренний и наружный диаметр катушки соответственно.

Для рядовой катушки  $K_y = 0,70$ , для шахматной  $K_y = 0,80-0,82$ , для катушки в навал порядка  $K_y = 0,75-0,80$ .

Зная число витков катушки  $n$ , тип катушки и примерную величину  $K_y$ , находят разность диаметров или толщину катушки ( $2H = D_2 - D_1$ ) при заданном  $h$  или, наоборот, при заданном  $D_2 - D_1$  – величину  $h$ . Диаметры  $D_1$  и  $D_2$  зависят от конструкции оптической колонны. По длине среднего витка, катушки, удельному сопротивлению провода и числу витков определяют сопротивление катушки.

Каркас катушки обычно выполняется из изоляционного материала с учетом его вакуумных свойств. Это может быть керамика, стекло, полиэтилен, полистирол или полиамид. Изготавливать металлический каркас из электропроводящих материалов нецелесообразно, т. к. это затрудняет юстировку системы. Наружный магнитный кожух изготавливается из магнитомягкого материала, обычно армко-железа.

Детали магнитопровода после изготовления тщательно отжигаются для улучшения однородности магнитных свойств. Толщина материала выбирается по минимуму магнитосопротивления и обычно составляет 2–3 мм. Величина магнитосопротивления определяется из соотношения

$$R_M \approx \frac{l}{\mu_0 S}. \quad (5.36)$$

Для обеспечения высококачественных параметров и уменьшения асимметрии магнитный кожух обычно собирается из точных деталей с особой тщательностью.

С основной фокусирующей катушкой могут быть совмещены катушки динамической подфокусировки луча. Назначение катушки динамической подфокусировки – улучшение качества фокусировки по краям зоны обработки.

## 6 СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

### 6.1 Электростатические отклоняющие системы

Отклонить электронный луч на небольшие углы можно, пропустив его через отклоняющий конденсатор (рисунок 6.1). Электрическое поле должно быть направлено параллельно направлению отклонения луча и самому направлению распространения луча. Если считать электрическое поле между пластинами конденсатора однородным на рабочем участке и пренебречь краевым эффектом, то при выходе из конденсатора угол отклонения луча составит

$$\Theta_e \approx \text{tg}\Theta_e \approx \frac{eEl}{m_0v^2}, \quad (6.1)$$

где  $e$ ,  $m_0$ ,  $v$  – заряд, масса и скорость электрона;

$E$  – напряженность электрического поля;

$l$  – ширина пластин.

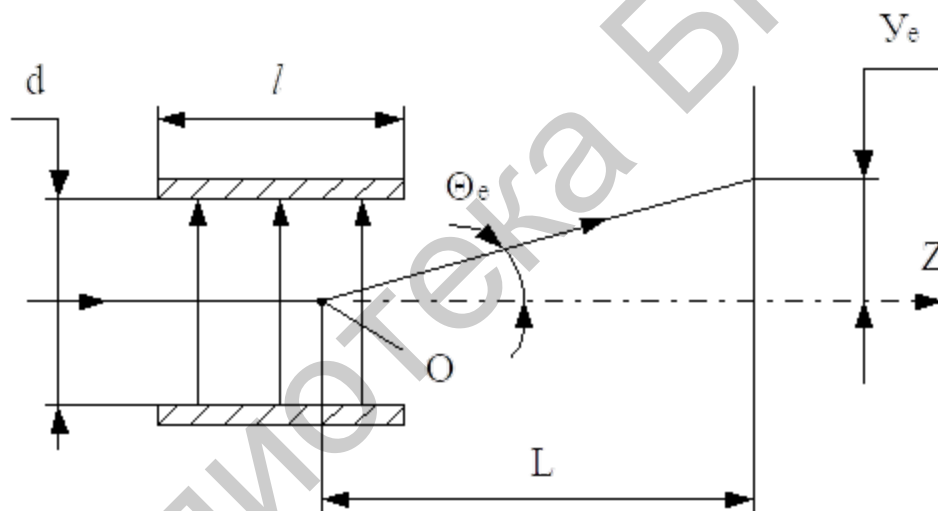


Рисунок 6.1 – Схема электростатической отклоняющей системы

Точка пересечения линии, которая является продолжением оси отклоненного пучка вне поля отклоняющей системы (ОС) с начальным направлением оси пучка, называется **центром отклонения**. После выхода из конденсатора электрон движется по прямой под углом  $\Theta_e$ . Предполагается, что место излома (точка  $O$ ) находится посередине конденсатора. При расстоянии от центра отклонения до плоскости обработки  $L$  величина абсолютного отклонения на плоскости обработки составит

$$Y_e = L \cdot \text{tg}\Theta_e \approx L \cdot \Theta_e = \frac{eEl \cdot L}{m_0v^2} = \frac{eEl \cdot L}{2eU_a} = \frac{U_0 \cdot l \cdot L}{2U_a \cdot d}, \quad (6.2)$$

где  $l$  – длина пластин;

$U_0$  – напряжение на пластинах ( $U_0 = E/d$ );

$d$  – расстояние между пластинами.

Величина

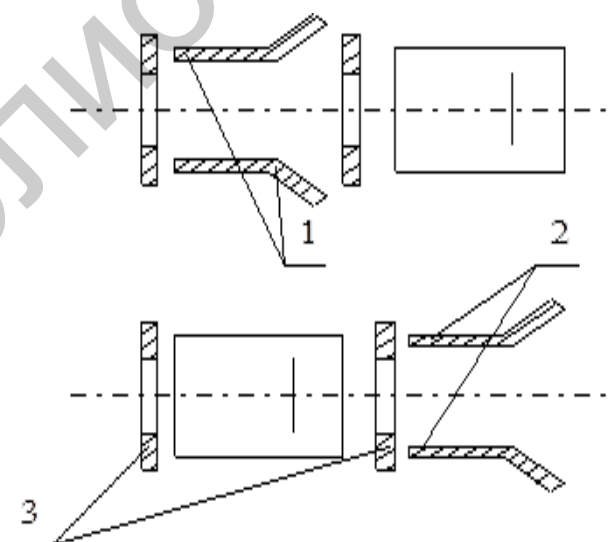
$$\varepsilon_e = \frac{Y_e}{U_0} = \frac{l \cdot L}{2U_a \cdot d} \quad (6.3)$$

называется чувствительностью электростатической ОС. Она определяет величину линейного отклонения при напряжении на пластинах в один вольт.

Как видно из формулы (6.3), чувствительность электростатических ОС не зависит от массы и заряда отклоняемой частицы. Чувствительность сильно зависит от величины ускоряющего напряжения ( $U_a$ ) и расстояния от центра отклонения до плоскости обработки ( $L$ ), поэтому ОС, расположенные ближе к плоскости обработки, при одних и тех же прочих условиях будут иметь меньшую чувствительность.

Для электростатического отклонения электронного луча обычно используются две пары пластин (рисунок 6.2), отклоняющих его во взаимно перпендикулярных направлениях. Располагают их последовательно одна за другой и, как правило, тщательно экранируют друг от друга. Совмещение электростатических ОС в пространстве невыгодно по трем причинам:

- 1) увеличение расстояния между пластинами уменьшает чувствительность по отклонению;
- 2) взаимодействие электрических полей создает дополнительные искажения луча;
- 3) при совмещении двух пар пластин значительно увеличивается паразитная емкость системы.



1 – пластины вертикального отклонения; 2 – пластины горизонтального отклонения; 3 – экраны

Рисунок 6.2 – Схема двухкоординатной электростатической ОС



## 6.2 Электромагнитные отклоняющие системы

В магнитной системе отклонения луча пучок электронов пролетает через магнитное поле, образованное катушками, и меняет свою траекторию в зависимости от силы тока в них. Электромагнитные ОС (рисунок 6.3) обладают рядом преимуществ и получили наибольшее распространение. В таких ОС магнитное поле должно быть направлено перпендикулярно направлению отклонения пучка. Если считать поле однородным и пренебречь краевым эффектом, то угол отклонения равен

$$\Theta_M = \frac{e}{mv} \cdot H \cdot l. \quad (6.4)$$

Здесь  $l$  – длина участка однородного магнитного поля. При небольших скоростях электронов, когда  $m \approx m_0$ ,

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\Theta_M = \Theta_M &= \sqrt{\frac{e}{2m_0U_a} \cdot H \cdot l}, \\ Y_M &= \sqrt{\frac{e}{2m_0U_a} \cdot H \cdot l \cdot L}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

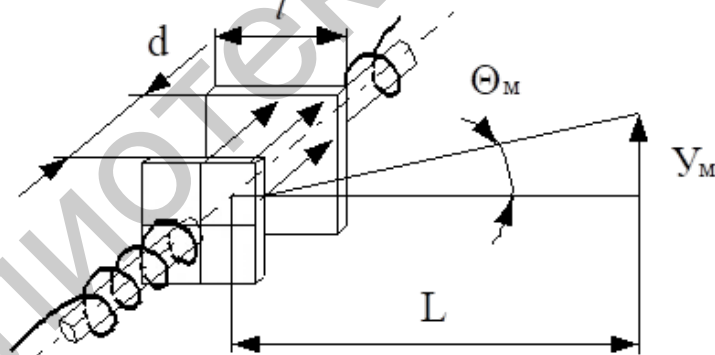


Рисунок 6.3 – Схема электромагнитной ОС

В отличие от электрического поля величина отклонения в магнитном поле зависит от заряда и массы частицы. Поэтому электромагнитные ОС используются для отведения в сторону ионов, попадающих в излучатель.

Чувствительность магнитных ОС определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{Y_M}{H} = l \cdot L \cdot \sqrt{\frac{e}{2m_0U_a}}. \quad (6.6)$$

В электромагнитных системах электроны движутся по окружности радиусом  $r$ , угол отклонения рассчитывается по следующим формулам:

$$\sin\theta = 2,97 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot B \cdot U_a^{-\frac{1}{2}}, \quad (6.7)$$

$$r = \frac{1}{B} \left( \frac{2m}{e} U_a \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.8)$$

где  $l$  – длина участка однородного магнитного поля, м;

$B$  – магнитная индукция, Тл;

$U_a$  – напряжение анода, В.

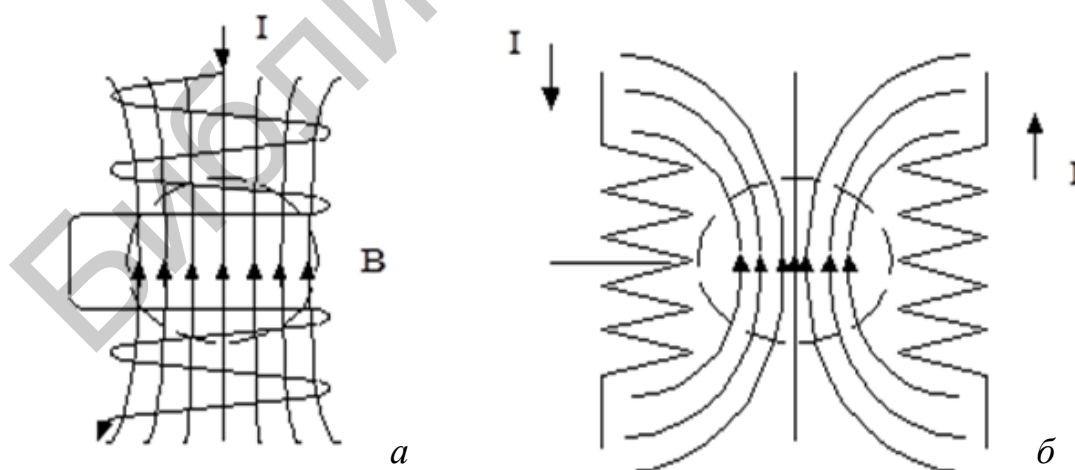
Магнитная индукция прямо пропорциональна магнитодвижущей силе возбуждения  $n \cdot I$  и обратно пропорционально расстоянию между полюсными башмаками:

$$B = \mu_0 n \cdot I / d, \quad (6.9)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Постоянство чувствительности (линейность отклонения) наблюдается, когда электронный луч не выходит за пределы однородного поля. Поэтому конструктивно катушки выполняются так, чтобы обеспечить однородное магнитное поле. Применяется два типа электромагнитных ОС с последовательно и параллельно складываемыми магнитными потоками.

**ОС с последовательным сложением магнитных полей** (рисунок 6.4) более экономичны, т. к. в этом случае для отклонения луча используется большая часть запасаемой в катушке магнитной энергии. В ОС с параллельно складываемыми потоками энергии область отклонения пронизывается только потоком рассеяния, а большая часть энергии не используется. Повысить экономичность можно, применив магнитопроводы из ферромагнитных материалов. Поэтому в конструкции электромагнитных ОС вводятся сердечники и экраны.



*a* – ОС с последовательно складываемыми магнитными потоками;

*б* – ОС с параллельно складываемыми магнитными потоками

Рисунок 6.4 – Схема сложения магнитных полей

### 6.3 Системы с параллельно складываемыми магнитными полями

Катушки с параллельно складываемыми потоками надевают на сердечники из магнитно-мягких материалов. Обмотки делают секционированными, т. к. подбором витков в секциях можно обеспечить лучшую однородность поля. Секционирование также уменьшает емкость катушки. Поскольку в системах с параллельными магнитными потоками магнитопровод помещается внутри катушки, их называют **системами с внутренним магнитопроводом** (рисунок 6.5). Для уменьшения габаритов разработаны ОС цилиндрической формы (рисунок 6.6).

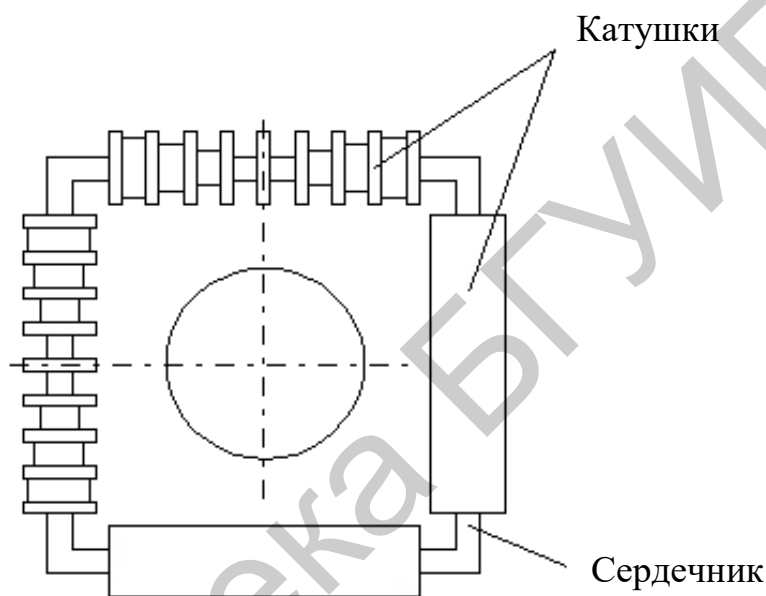
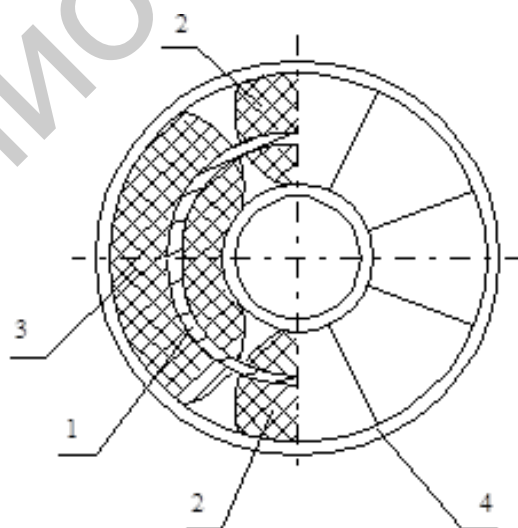


Рисунок 6.5 – ОС с Г-образными сердечниками



1 – магнитопровод; 2 – катушки горизонтального отклонения;  
3 – катушки вертикального отклонения; 4 – пластмассовая гильза

Рисунок 6.6 – ОС с цилиндрическими сердечниками

## 6.4 Системы с последовательным сложением магнитных полей

Системы с последовательным сложением магнитных полей обычно не имеют внутренних сердечников и образуются катушками, непосредственно прилегающими к каналу прохождения луча. Катушкам придают седловидную форму так, что витки облегают канал прохождения луча. Края катушки отгибают в стороны для уменьшения влияния магнитного поля при выходе луча из ОС (рисунок 6.7).

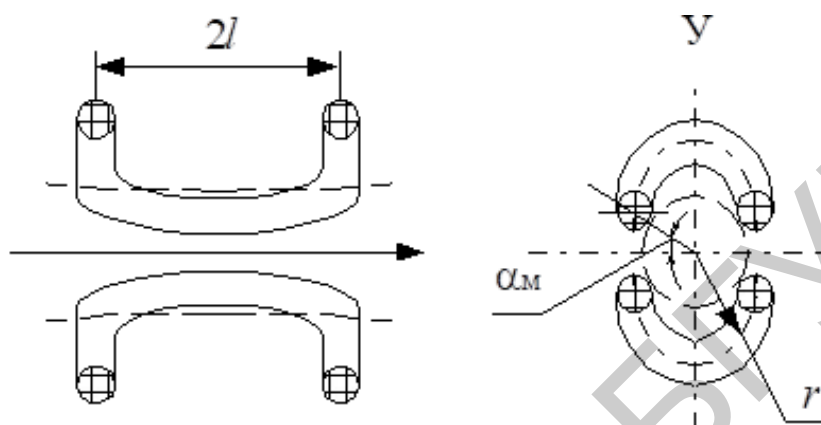


Рисунок 6.7 – ОС с последовательным сложением магнитных полей

Если  $L > l$  и  $L > r$ , то угол отклонения, обеспечиваемый одной парой таких катушек, определяется соотношением

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{I \cdot n \cdot l \cdot \cos(\alpha_M)}{2,1 \cdot r \cdot \sqrt{U_a}}. \quad (6.10)$$

Величина отклонения равна

$$Y_m = \frac{I \cdot n \cdot l \cdot L \cdot \cos(\alpha_M)}{2,1 \cdot r \cdot \sqrt{U_a}}. \quad (6.11)$$

Из уравнения видно, что угол отклонения прямо пропорционален ампервиткам ОС, ее длине,  $\cos(\alpha_M)$ , определяющего расположение эквивалентного витка катушки (находится в центре тяжести катушки) и обратно пропорционален корню квадратному из ускоряющего напряжения  $U_a$ . Соответственно всегда выгоднее выбирать максимальную длину ОС при наименьшем ее диаметре. Искажения расчетных параметров, вызываемые полем торцевых витков, составляют не более 2–4 % от общей величины отклонения. При равномерном распределении витков в катушке поле в нем будет бочкообразным, неравномерным (рисунок 6.8). Нетрудно подсчитать распределение витков для обеспечения равномерности поля.

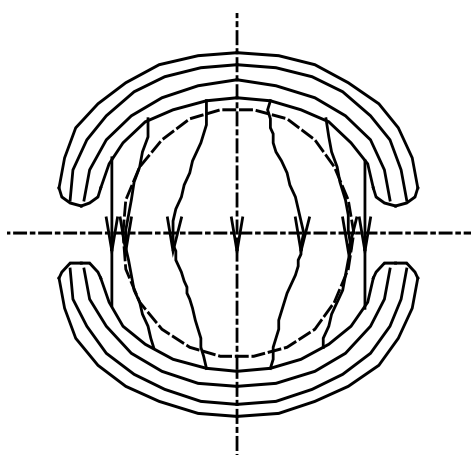


Рисунок 6.8 – Бочкообразность магнитного поля

Число ампер-витков значительно уменьшается при использовании магнитного экрана за счет уменьшения энергии рассеяния поля. Для отклонения электронного пучка на одну и ту же величину в различных ОС требуется различное число ампер-витков. Установка магнитного экрана на отклоняющей седлообразной катушке увеличивает ее чувствительность и сокращает число ампер-витков примерно вдвое. Магнитный экран обычно выполняется в виде цилиндра и устанавливается с наружной стороны катушки. Поскольку магнитопровод находится снаружи, такие ОС называют ОС с внешним магнитопроводом. Магнитопровод для низких частот (НЧ) изготавливают из армко-железа, а для высоких частот (ВЧ) – шихтованным из пластин или ферритов.

## 7 РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Большие угловые отклонения электронного луча вызывают значительные aberrации, а увеличение фокусного расстояния последней линзы при малых отклонениях делает конструкцию громоздкой, ухудшает разрешение, повышает чувствительность к внешним электромагнитным полям.

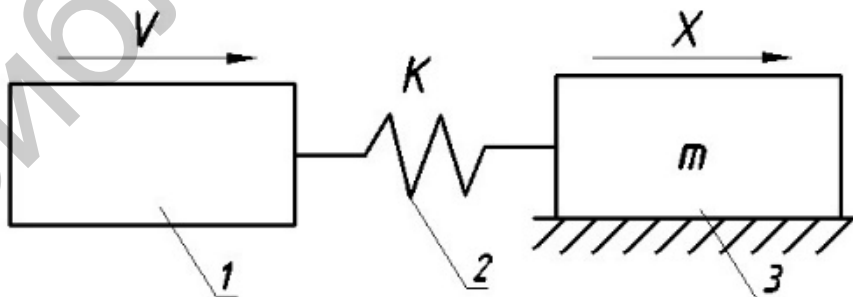
Обычно прецизионное электронное пятно смещается в пределах квадрата  $2 \times 2$  мм, реже –  $4 \times 4$  мм. Размеры обрабатываемых деталей достигают  $100 \times 100$  мм и более. Малое перемещение луча по сравнению с размерами обрабатываемой детали вызывает необходимость применения координатных столов. Это позволяет после обработки небольшого участка (одного модуля) перейти к следующему и т. д. Точность перемещения координатного стола должна быть достаточно высокой, выше требований к точности обработки, т. к. погрешность перемещения складывается с погрешностями, привода системы и базирования заготовки. Точность перемещения современных прецизионных столов достигает  $0,1$  мкм при скорости вывода на позицию до  $20$  мм/с. Создание такого стола, да еще работающего в вакууме, – серьезная конструкторская задача.

### 7.1 Основные параметры системы микроперемещений

**Малые перемещения** – перемещения, малые в отношении скорости движения или пути, которые широко используются в приборостроении.

Точность малых перемещений зависит от динамических свойств упругой системы привода, жесткости привода и трения в направляющих. При определенных условиях в системе привода возникают самовозбуждающиеся колебания с периодическими остановками и скачками. Это ограничивает достижимую точность перемещений.

Рассмотрим поведение упругой системы при определенной характеристике сил трения (рисунок 7.1).



- 1 – двигатель (задающее устройство), имеющий постоянную скорость  $V$ ;  
2 – привод с приведенной жесткостью  $K$ ; 3 – исполнительный орган – тело массой  $m$ , скользящее с трением по неподвижной плоскости

Рисунок 7.1 – Схема упругой системы

Тело 3 всегда находится под действием упругой силы привода, силы инерции и силы трения. Движение твердого тела может начаться, лишь когда упругая сила привода превысит рубежное значение силы статического трения:

$$Kx_0 > F_0, \quad (7.1)$$

где  $x_0$  – смещение привода 2 к началу движения исполнительного органа 3;

$F_0$  – статическая сила трения (трение покоя тела 3 массой  $m$  по неподвижной плоскости).

Уравнение движения с учетом затухания имеет вид

$$m\ddot{x} + \beta_1(\dot{x} - V) - K(x_0 + Vt - x) + (F - \beta_2\dot{x}) = 0, \quad (7.2)$$

где  $\dot{x}$  и  $\ddot{x}$  – скорость и ускорение тела 3 соответственно;

$\beta_1$  – коэффициент вязкого затухания в приводе;

$t$  – текущее время;

$F - \beta_2$  – сила кинетического трения (при наличии постоянной составляющей  $F$  и падающей характеристики по скорости с коэффициентом пропорциональности  $\beta_2$ ).

Решение этого уравнения дает возможность изменения скорости и ускорения во времени:

$$\dot{x} = V\{1 - e^{-\theta\omega t}[\cos\omega t + (\theta - A)\sin\omega t]\}, \quad (7.3)$$

$$\ddot{x} = V\omega e^{-\theta\omega t}[A\cos\omega t + (1 + A\theta)\sin\omega t], \quad (7.4)$$

где  $\theta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2\sqrt{Km}}$ ,  $\omega = \sqrt{K/m}$ ,  $A = \frac{\Delta F}{V\sqrt{Km}}$ ,  $\Delta F = F_0 - F$ .

В случае  $\dot{x} = 0$  и  $\ddot{x} = 0$  будет иметь место остановка тела (скачок). Это означает выполнение следующего условия:

$$1 = e^{-\theta\omega t}[\cos\omega t_1 + (\theta + A_c)\sin\omega t_1], \quad (7.5)$$

$$A_c\cos\omega t_1 + (1 - A_c\theta)\sin\omega t_1 = 0. \quad (7.6)$$

$\dot{x} = 0$  и  $\ddot{x} = 0$  лишь при определенных значениях  $A = A_{кр} = A_c$  и коэффициента затухания  $\theta$ . Решение системы уравнений дает возможность связать  $A = A_c$  с коэффициентом затухания:

$$A_c \approx \sqrt{4\pi\theta}, A = \frac{\Delta F}{V\sqrt{Km}}. \quad (7.7)$$

Значения коэффициентов затухания в некоторых соединениях и конструкциях приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Коэффициенты затухания в соединениях и узлах конструкций

Соединение, узел	Коэффициент затухания, $\theta$
1 Неподвижный плоский стык	0,012
2 Неподвижное цилиндрическое соединение	0,025
3 Направляющие:	
скольжения	0,06–0,08
качения	0,03–0,05
гидростатические	0,12–0,16
4 Винт – гайка:	
скольжения	0,04–0,06
качения	0,04–0,05
гидростатические	0,10–0,18
5 Упорные подшипники качения	0,015–0,025
6 Привод подачи узла на направляющих качения	0,05–0,06
7 Шпиндель:	
с опорами качения	0,04–0,05
с гидростатическими опорами	0,10–0,12

## 7.2 Расчет критической скорости, резонансной частоты и затухания

Если известны свойства упругой системы привода (жесткость  $K$ , масса  $m$ , трение  $\Delta F$ ), то критическому значению параметра  $A_c$  соответствует определенное значение скорости, при которой возможен переход непрерывного значения в прерывистое. Критическая скорость может быть представлена в виде

$$V_c = \frac{\Delta F}{\sqrt{4\pi\theta\sqrt{Km}}}, \quad (7.8)$$

где  $\Delta F$  – разность сил статического и кинетического трения ( $\Delta F = F_0 - F$ ).

Как правило,  $F_0 > F$ ; величина  $F_0$  растет с увеличением продолжительности контакта.

Наибольшие трудности при расчете значений критической скорости связаны с определением коэффициентов затухания  $\theta$ . Величина коэффициента затухания зависит от вида соединений, материалов сопрягаемых деталей, наличия сухого трения.

Если скорость задающего узла двигателя непостоянна и является некоторой периодической функцией времени

$$V = V_0(1 + \alpha \cos \omega_0 t), \quad (7.9)$$

где  $V_0$  – среднее значение скорости;

$\alpha$  – относительная амплитуда колебаний скорости;



$\omega$  – частота периодических изменений скорости,  
то значение критической скорости в значительной степени зависит от частоты изменения скорости  $\omega_0$ . При этом возможны три случая:

1)  $\omega_0 < \omega_{\text{соб}}$  – изменение скорости двигателя практически не влияет на величину  $V_c$ ;

2)  $\omega_0 = \omega_{\text{соб}}$  – условие резонанса, частота изменения внешней нагрузки совпадает с частотой собственных колебаний, при этом критическая скорость  $V_c$  резко увеличивается;

3)  $\omega_0 > \omega_{\text{соб}}$  –  $V_c$  уменьшается в несколько раз и возможность перехода в зону прерывистого движения отодвигается в зону малых скоростей. Последнее является положительным моментом и служит основанием для использования высокочастотных колебаний как эффективного средства борьбы со скачкообразным скольжением при малых скоростях.

### 7.3 Расчет параметров прерывистого движения

Для каждой упругой системы привода имеется вполне определенное значение  $V_c$ . Если заданная скорость подачи меньше  $V_c$ , то неизбежно прерывистое движение. Оно характеризуется следующими параметрами (рисунок 7.2):

- 1) продолжительностью скачка (движения)  $t_1$ ;
- 2) продолжительностью остановки  $t_2$ ;
- 3) линейной величиной скачка  $S = V(t_1 + t_2)$ ;
- 4) максимальной скоростью скачка  $t_{\text{max}}$ .

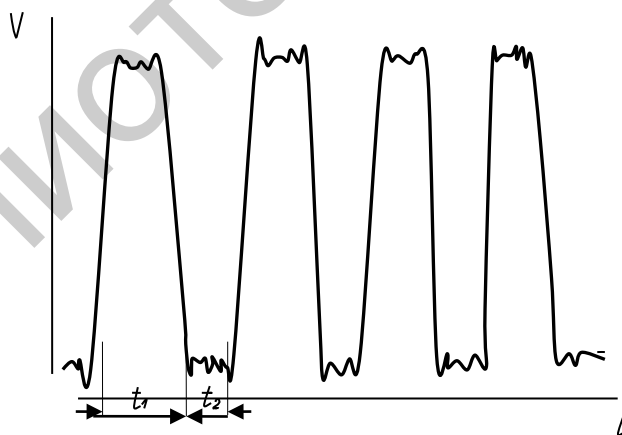


Рисунок 7.2 – Схема прерывистого движения

Продолжительность скачка  $t_1$  может изменяться в довольно узких пределах  $\pi \leq \omega t_1 \leq 2\pi$  (от полупериода до периода собственных колебаний упругой системы привода). Продолжительность остановки  $t_2$  может быть определена из условия, что за это время увеличение силы упругости привода должно равняться увеличению силы трения:

$$KVt_2 = F_0 - F. \quad (7.10)$$

Для частных случаев:

$$V = V_c, \quad \omega t_1 \cong 2\pi - \sqrt{4\pi\theta}, \quad \omega t_2 = \frac{\Delta F}{V_c \sqrt{Km}}, \quad (7.11)$$

$$V \ll V_c, \quad \omega t_1 \cong \pi, \quad \omega t_2 = \frac{\Delta F}{V \sqrt{Km}} (2 - \pi\theta). \quad (7.12)$$

В таблице 7.2 приведены коэффициенты трения покоя и движения различных материалов.

Таблица 7.2 – Коэффициенты трения покоя и движения

Материал	Коэффициент трения						
	покоя			движения			
	время контакта, $t$			при скорости движения $V$ , мм/мин			
	2 с	10 мин	60 мин	0,8	5,0	20,0	110,0
Чугун СЧ 21-40	0,27	0,27	0,28	0,22	0,18	0,18	0,17
Сталь 45	0,30	0,30	0,32	0,28	0,25	0,22	0,18
Бр. ОЦС 6-6-3	–	–	–	0,22	0,20	0,18	0,17
ЦАМ – 10-5	0,19	–	0,25	0,15	0,214	0,12	0,11
Текстолит	0,33	0,35	0,37	0,27	0,22	0,20	0,18
Гетинакс	0,33	0,38	0,40	0,27	0,23	0,20	0,18
Капрон Б	0,33	–	–	0,28	0,23	0,20	0,17
Фторопласт	0,05	0,05	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03
Бр. ОФ10-1	0,18	0,20	–	0,18	–	0,16	0,181
Латунь Л62	0,27	0,28	–	0,24	–	0,22	0,16

Неравномерность движения оценивается выражением

$$\Delta V = \frac{V_{\max} - V}{V}. \quad (7.13)$$

#### 7.4 Обеспечение требуемой точности перестановки

На точность перестановки (перемещения на строго заданную величину) влияет непостоянство силы кинетического трения в зависимости от длительности контакта, деформация привода подачи.

При перемещении задающего устройства на расстояние  $Q$  (рисунок 7.3), рабочий орган переместится на величину  $X$ . Неравенство  $Q \neq X$  объясняется упругой деформацией привода. Точность перестановки определяется как  $\Delta = Q - X$ .

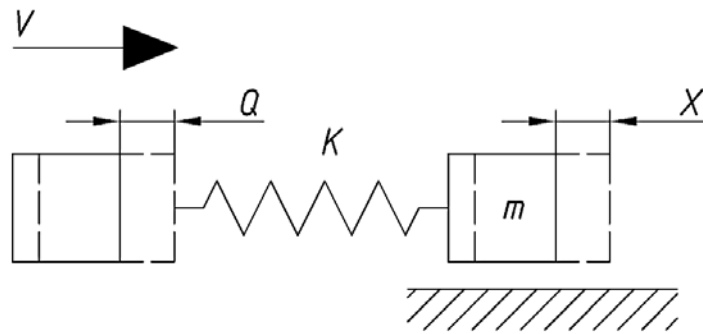
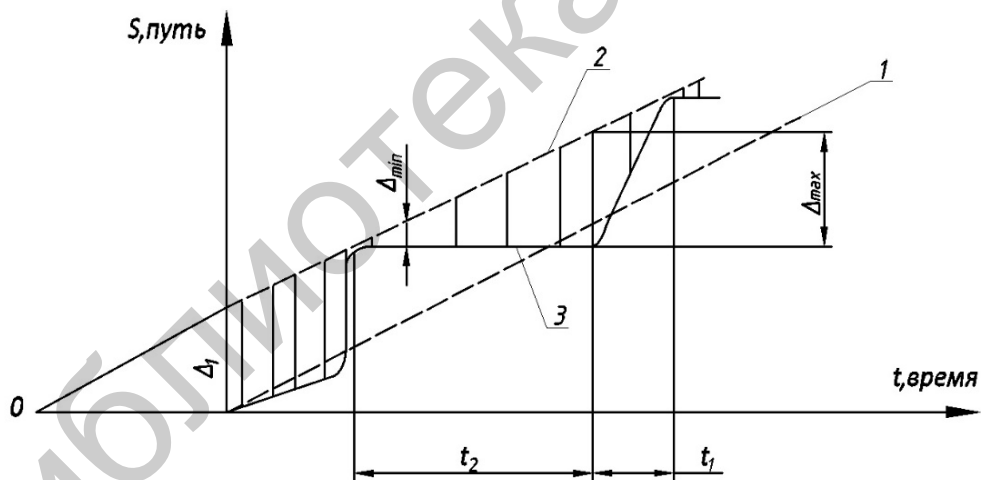


Рисунок 7.3 – Схема определения точности перестановки

Очевидно, что пока не будет преодолена сила статического трения, т. е. пока  $Q < F_0/K$ , перемещение  $X = 0$ . Если полагать, что начальная деформация привода отсутствует, погрешность перестановки  $\Delta_1 = F_0/K$ . При совместном движении задающего устройства и передвигаемого узла она может принимать различные значения в пределах, зависящих от характера движения. Если  $V \leq V_c$ , то движение прерывистое, скачкообразное. В зависимости от величины заданного перемещения двигатель может прекратить движение либо во время останова узла, либо во время его очередного скачка. Можно построить график перемещения при малых скоростях  $V < V_c$  (рисунок 7.4).



1 – равномерное перемещение исполнительного механизма ( $V > V_c$ );  
 2 – равномерное перемещение двигателя; 3 – реальное перемещение исполнительного механизма ( $V \leq V_c$ );  $\Delta_1$  – начальная погрешность перестановки;  $\Delta_{\min}$  – минимальная погрешность перестановки

Рисунок 7.4 – График перемещения при малых скоростях

К началу остановки ошибка равна

$$\Delta = \Delta_{\min} = \Delta_1 - V_{\max} t_1. \quad (7.14)$$

К концу остановки ошибка максимальна:

$$\Delta_{\max} = \Delta_1 + Vt_2. \quad (7.15)$$

Анализ факторов, влияющих на величину скорости  $V_c$ , позволяет определить основные пути повышения точности перестановки и равномерности движения:

1 Уменьшение разности сил статического и кинематического трения (применение материалов с минимальным значением коэффициента трения, антикачковых смазок, гидродинамического и гидростатического режима смазки, замена сил трения скольжения трением качения, принудительное осциллирование внешних возбуждающих факторов).

2 Увеличение жесткости привода. Этот способ особенно эффективен в области малых скоростей, но часто сопряжен с конструктивными трудностями.

3 Увеличение коэффициента затухания в цепи привода в направляющих.

**Применение специальных материалов и смазки.** Основная причина неравномерности малых перемещений – различие  $\Delta F$  между трением покоя и трением движения. Поэтому при выборе материалов и смазки надо руководствоваться не только антифрикционными свойствами, но и способностью уменьшить разницу между коэффициентами статического и кинематического трения. Наиболее перспективной парой с этой точки зрения являются: металл – фторопласт 4, металл – бронзовая металлокерамика, пропитанная фторопластом 4. Из-за низкой износостойкости этих материалов при абразивном изнашивании их можно применять только при работе с чистой смазкой и давлениях не более  $1 \cdot 10^5$  Н. Введение в обычные промышленные масла поверхностно-активной присадки – олеиновой кислоты – существенно повышает прочность масляной пленки, снижает  $\Delta F$ . Лучшие результаты получены при применении специальных масел ВНИИ НП-40. Коэффициенты трения, получаемые при применении специальных масел, приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Коэффициент трения покоя и движения для различных масел

Масло	Материал (трение по СЧ 21-40)	Коэффициент трения					
		покоя			скольжения		
		при времени контакта			при скорости движения, мм/мин		
		2 с	1 мин	1 ч	0,8	20	110
ВНИИ НП-401	СЧ 21-40	0,09	0,09	0,10	0,08	0,07	0,08
Индустриальное 12	СЧ 21-40	0,32	0,35	0,37	0,28	0,20	0,17
ВНИИ НП-401	Бр. ОЦС 6-6-3	0,05	0,06	–	0,04	0,07	0,08
ВНИИ НП-401	ЦАМ 10-5	0,03	0,19	0,04	0,03	0,05	0,07
ВНИИ НП-401	Текстолит ПТ	0,18	0,09	0,20	0,14	0,11	0,11

**Принудительное осциллирование узла** с очень малой амплитудой и промышленной частотой 25–500 Гц в плоскости, перпендикулярной плоскости

скольжения, значительно снижает  $\Delta F$  и соответственно  $V_c$ . При работе сначала включают рабочий привод, а затем вибратор, что обеспечивает повышение точности перестановки.

**Повышение жесткости механизма привода.** Равномерность движения зависит от жесткости приводного механизма, приведенной к его последнему звену, которая определяется по следующей формуле:

$$K = \left( \frac{i_0^2}{\eta_0} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \frac{i_i^2}{\eta_i} + l_0 \right)^{-1}, \quad (7.16)$$

где  $l_i$  – угловая податливость  $i$ -го звена кинематической цепи;

$i_i, \eta_i$  – передаточное отношение и КПД участка цепи между  $i$ -м и последним звеном;

$l_0, \eta_0$  – суммарная податливость и КПД последнего звена.

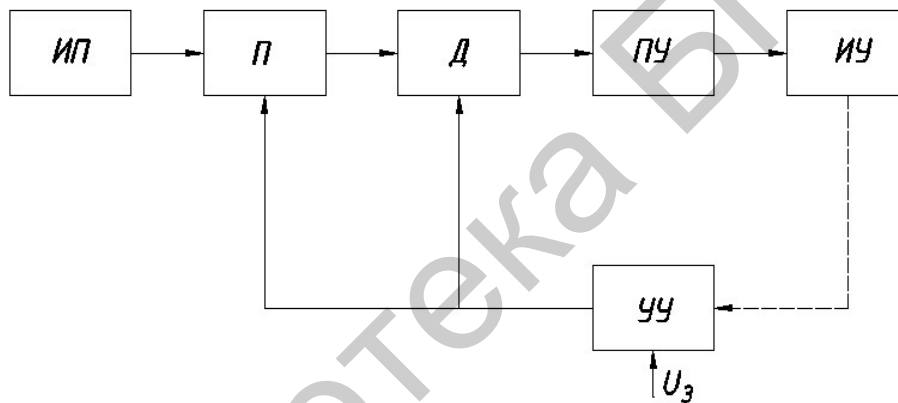
Для повышения приведенной жесткости целесообразно выбирать наибольшую редукцию на последнем звене, вводить в конце цепи подачи самотормозящую пару.

## 8 ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

### 8.1 Структура и классификация электроприводов

Электроприводом называется устройство, состоящее из электродвигателя (Д), передаточного устройства (ПУ), силового преобразователя (П) и управляющего устройства (УУ) (рисунок 8.1).

Электродвигатель преобразует энергию источника питания (ИП) в механическую энергию вращающегося вала или линейно перемещающихся масс (линейный двигатель). То есть он должен развивать движущее усилие – движущий момент, или движущую механическую силу, передаваемую исполнительному устройству (ИУ). В некоторых случаях электродвигатель осуществляет обратное преобразование механической энергии, поступающей от исполнительного устройства, в электрическую. В этом случае он создает тормозной момент.



$U_3$  – задающий сигнал

Рисунок 8.1 – Структурная схема электропривода

В электроприводе двигатель приводит в движение исполнительное устройство через передаточные, понижающие либо повышающие частоту вращения (редукторы, клиноременные передачи и др.) или изменяющее вид движения (зубчато-реечные, кривошипно-шатунные и т. д.) механизмы. В некоторых приводах он непосредственно соединен с исполнительным устройством.

Силовой преобразователь необходим по следующим причинам:

1) у электроприводов должна изменяться частота вращения. Как правило, этого добиваются регулированием напряжения или тока, потребляемого двигателем, поскольку указанные параметры источников питания неизменные;

2) для работы двигателей постоянного тока необходимо преобразовывать переменное напряжение сети в постоянное.

Для регулирования напряжения и частоты, а также для преобразования одного вида напряжения в другой используют преобразователи.

УУ электроприводов служит для управления преобразованием электро-энергии. Управление совершается воздействием на преобразователь и двигатель управляющих сигналов, выработанных УУ. Управляющий сигнал может формироваться с учетом только задающего сигнала  $U_3$  или задающего сигнала и сигналов, поступающих от других элементов привода. На рисунке 8.1 приведен случай, когда на УУ поступают сигналы только от ИУ. Связи, обеспечивающие поступление сигналов на УУ от других элементов, называются обратными.

Электроприводы делятся на классы. В класс входят приводы, обладающие каким-то общим признаком (двигатель, силовой преобразователь и т. д.).

По видам регулирования выделяют следующие приводы:

– **нерегулируемые**, которые приводят в движение исполнительные устройства с одной и той же скоростью, т. е. обеспечивают простейшие операции (пуск, остановка, реверсирование двигателя и т. п.). При этом в установленном режиме частота вращения определяется естественной механической характеристикой и моментом статической нагрузки;

– **регулируемые**, в которых частота вращения двигателя способна изменяться под воздействием сигнала управления;

– **следящие приводы** способны обеспечивать автоматическое преобразование любого не заданного заранее входного сигнала в движение исполнительного устройства. Например, таким сигналом может быть угол поворота входного вала, в результате чего выходной вал исполнительного устройства должен повторять его движение;

– **программно-управляемые**, у которых линейное или вращательное перемещение осуществляется по заданной программе;

– **адаптивные приводы** способны осуществлять автоматический выбор наилучшего режима работы двигателя при изменении структуры и параметров системы управления.

## 8.2 Выбор электродвигателя при позиционном режиме работы

Рассмотрим вопрос выбора электродвигателя для приводов, обеспечивающих вращательное движение. Будем исходить из того, что закон изменения угловой скорости  $\dot{\varphi}$  (рад/с) исполнительного органа (нагрузки) при перемещении на угол отработки  $\varphi_0$  (рад) является трапецеидальным. Если форсирование электродвигателя по моменту и скорости не используется и основную нагрузку привода составляет динамический момент (случай статически уравновешенного исполнительного органа в приводах, обеспечивающих вращение относительно вертикальной оси координат), то уравнения движения нагрузки имеют вид:

1) при разгоне:

$$M_{д.н} = \frac{J_H \cdot \ddot{\varphi}_P}{i\eta} + J'_д i \ddot{\varphi}_P; \quad (8.1)$$

2) при торможении:

$$M_{д.н} = \frac{J_H \cdot \ddot{\phi}_T}{i} \eta + J'_D i \ddot{\phi}_T, \quad (8.2)$$

где  $M_{д.н}$  – номинальный момент электродвигателя, Н·м;

$J_H$  – приведенный к выходному валу передаточного устройства момент инерции нагрузки, т. е. момент инерции от исполнительного органа плюс момент инерции от полезного груза, кг · м<sup>2</sup>;

$\ddot{\phi}_P, \ddot{\phi}_T$  – угловое ускорение исполнительного органа и полезного груза соответственно при разгоне и торможении, рад/с<sup>2</sup>;

$J'_D$  – момент инерции ротора электродвигателя с учетом момента инерции передаточного устройства ( $J'_D = (1,1 - 1,4)J_D$ ), кг · м<sup>2</sup>;

$J_D$  – момент инерции ротора электродвигателя;

$\eta \cdot i$  – коэффициент полезного действия (КПД) ПУ. Для упрощения расчетов будем считать, что КПД прямого и обратного ходов ПУ равны;

$i$  – передаточное отношение ПУ.

Момент инерции  $J_H$  зависит от конфигурации исполнительного органа и массы перемещаемого груза. На стадии проектирования наибольшее его значение можно определить по формуле

$$J_H = (1,8 - 2,3) \cdot J_{И},$$

где  $J_{И}$  – момент инерции от максимального полезного груза при максимальном радиусе вращения, кг · м<sup>2</sup>.

Из формул (8.1) и (8.2) получаем следующие выражения для расчета ускорений при разгоне и торможении:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}_P &= \frac{M_{д.н} \cdot i}{J_H \cdot \eta^{-1} + J'_D \cdot i^2}, \\ \ddot{\phi}_T &= \frac{M_{д.н} \cdot i}{J_H \cdot \eta + J'_D \cdot i^2}. \end{aligned} \quad (8.3)$$

На участке движения с постоянной скоростью можно принять, что максимальная скорость нагрузки (рад/с) равна

$$\dot{\phi}_M = \frac{\dot{\phi}_{д.н}}{i}, \quad (8.4)$$

где  $\dot{\phi}_{д.н}$  – номинальная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

При равноускоренных разгоне и торможении время разгона и торможения с учетом уравнений (8.3) и (8.4) равны



$$t_P = \frac{\dot{\varphi}_M}{\ddot{\varphi}_P} = \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{M_{Д.Н}} (J_H \cdot \eta^{-1} \cdot i^{-2} + J'_Д), \quad (8.5)$$

$$t_T = \frac{\dot{\varphi}_M}{\ddot{\varphi}_T} = \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{M_{Д.Н}} (J_H \cdot \eta \cdot i^{-2} + J'_Д). \quad (8.6)$$

Время отработки  $t_0$  (с) и угол  $\varphi$  (рад) равны

$$\begin{aligned} t_0 &= t_P + t_{П.С} + t_T, \\ \varphi_0 &= \varphi_P + \varphi_{П.С} + \varphi_T, \end{aligned} \quad (8.7)$$

где  $\varphi_P, \varphi_{П.С}, \varphi_T$  – углы перемещения исполнительного органа и груза при разгоне, движении с постоянной скоростью и торможении соответственно.

Согласно уравнению (8.4), имеем

$$\dot{\varphi}_P = \frac{1}{2} \cdot t_P \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i}, \quad \dot{\varphi}_T = \frac{1}{2} \cdot t_T \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i}, \quad \dot{\varphi}_{П.С} = t_{П.С} \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i}. \quad (8.8)$$

Подставляя в выражение (8.7) значения, полученные из уравнения (8.8), определим

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \cdot t_P \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i} + t_{П.С} \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i} + \frac{1}{2} \cdot t_T \cdot \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i} = \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{i} \cdot \left( \frac{t_P + t_T}{2} + t_{П.С} \right). \quad (8.9)$$

Из уравнения (8.9) находим

$$\frac{t_P + t_T}{2} + t_{П.С} = \frac{\varphi_0 \cdot i}{\dot{\varphi}_{Д.Н}}. \quad (8.10)$$

Прибавляя к обеим частям равенства (8.10) выражение  $(t_P + t_T)/2$ , получаем

$$t_0 = t_P + t_{П.С} + t_T = \frac{\varphi_0 \cdot i}{\dot{\varphi}_{Д.Н}} + \frac{t_P + t_T}{2}. \quad (8.11)$$

Подставив в (8.11) выражения для  $t_P$  и  $t_T$  из (8.5) и (8.6), определим

$$t_0 = \frac{\varphi_0 \cdot i}{\dot{\varphi}_{Д.Н}} + \frac{\dot{\varphi}_{Д.Н}}{M_{Д.Н}} \left( J_H \cdot \frac{\eta + \eta^{-1}}{2} \cdot i^{-2} + J'_Д \right). \quad (8.12)$$

Принимая в формуле (8.12) в качестве переменной величины  $i$ , можно найти такое его значение, при котором  $t_0$  будет минимальным. Оптимальное по быстродействию передаточное отношение ПУ равно

$$i_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{\dot{\varphi}_{\text{д.н}} \cdot J_{\text{н}} \cdot (\eta + \eta^{-1})}{M_{\text{д.н}} \cdot \varphi_0}}. \quad (8.13)$$

При этом, согласно выражению (8.12), оптимальное время обработки

$$t_{\text{опт}} = 1,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{\dot{\varphi}_0^2 \cdot J_{\text{н}} \cdot (\eta + \eta^{-1})}{M_{\text{д.н}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{д.н}}} + \frac{J'_{\text{д}}}{M_{\text{д.н}}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{д.н}}}. \quad (8.14)$$

Это время является минимально возможным для заданного угла обработки. Последний член выражения представляет время разгона электродвигателя до номинальной скорости при воздействии номинального момента ( $t_{\text{р.д}}$ , с).

В таблице 8.1 показана зависимость  $i_{\text{опт}}$  и  $t_{\text{опт}}$  от КПД передачи. Значения  $i_{\text{опт}}$  и  $t_{\text{опт}}$  при  $\eta = 1$  приняты за идеальные –  $i_{\text{и}}$  и  $t_{\text{и}}$ .

Таблица 8.1 – Зависимость  $i_{\text{опт}}$  и  $t_{\text{опт}}$  от КПД передачи

$\eta$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
$i_{\text{опт}}/i_{\text{и}}$	1,002	1,008	1,02	1,043	1,077
$t_{\text{опт}}/t_{\text{и}}$	0,2	0,8	2	4,3	7,7

Видно, что пренебрежение небольшим статическим моментом, эквивалентным уменьшению КПД передачи, дает незначительную погрешность.

Выражение (8.13) справедливо только для трапецеидального закона перемещения нагрузки, т. е. когда

$$t_{\text{р}} + t_{\text{т}} \leq t_0. \quad (8.15)$$

Неравенство (8.15) с учетом (8.5), (8.6) и (8.12) приводится к виду

$$\frac{\dot{\varphi}_{\text{д.н}}}{M_{\text{д.н}}} \left( J_{\text{н}} \cdot \frac{\eta + \eta^{-1}}{2} \cdot i^{-2} + J'_{\text{д}} \right) \leq \frac{\varphi_0 \cdot i}{\dot{\varphi}_{\text{д.н}}}. \quad (8.16)$$

Подставляя в (8.16) выражение для  $t_{\text{опт}}$ , после преобразований получаем

$$i_{\text{опт}} \leq \sqrt{\frac{J_{\text{н}} \cdot (\eta + \eta^{-1})}{2J'_{\text{д}}}}. \quad (8.17)$$

Поэтому при расчете  $t_{\text{опт}}$  по формуле (8.13) следует проверять выполнение неравенства (8.17). Если оно не выполняется, передаточное отношение ПУ следует подсчитывать по формуле

$$i = \sqrt{\frac{J_{\text{Н}} \cdot (\eta + \eta^{-1})}{2J'_{\text{Д}}}}. \quad (8.18)$$

Требуемую мощность электродвигателя  $P_{\text{Д}}$  (Вт) можно определить из уравнения (8.14), если принять  $t_{\text{опт}} = t_0$  и учесть, что  $P_{\text{Д}} = M_{\text{Д.Н}} \cdot \dot{\varphi}_{\text{Д.Н}}$ :

$$P = 3,37 \cdot \frac{t_0^2 \cdot J_{\text{Н}} \cdot (\eta + \eta^{-1})}{(t_0 + t_{\text{Р.Д}})^3}. \quad (8.19)$$

Выше был рассмотрен пример, когда основную нагрузку привода составляет инерционный момент. Если статический момент  $M_{\text{С}}$  (Н·м), возникающий от неуравновешенных масс исполнительного органа (включая переносимый груз), достаточно велик, его необходимо учитывать при расчетах.

Принимая во внимание, что КПД механической передачи мало влияет на  $i_{\text{опт}}$  и  $t_{\text{опт}}$ , определение ускорений при разгоне и торможении можно производить исходя из следующих выражений:

$$\ddot{\varphi}_{\text{Р}} = \frac{M_{\text{Д.Н}} \cdot i - M_{\text{С}}}{J_{\text{Н}} + J'_{\text{Д}} \cdot i},$$

$$\ddot{\varphi}_{\text{Т}} = \frac{M_{\text{Д.Н}} \cdot i + M_{\text{С}}}{J_{\text{Н}} + J'_{\text{Д}} \cdot i}.$$

Время разгона и торможения определяется по аналогии с выражениями (8.5) и (8.10):

$$t_{\text{Р}} = \frac{\dot{\varphi}_{\text{Д.Н}}}{M_{\text{Д.Н}} \cdot i^{-2} - M_{\text{С}} \cdot i} (J_{\text{Н}} + J'_{\text{Д}} i'),$$

$$t_{\text{Т}} = \frac{\dot{\varphi}_{\text{Д.Н}}}{M_{\text{Д.Н}} \cdot i^2 - M_{\text{С}} \cdot i} (J_{\text{Н}} + J'_{\text{Д}} i').$$

Время отработки с учетом (8.11) можно найти следующим образом:

$$t_0 = \frac{\varphi_0 \cdot i}{\dot{\varphi}_{\text{Д.Н}}} + \frac{\dot{\varphi}_{\text{Д.Н}} \cdot M (J_{\text{Н}} + J'_{\text{Д}} i')}{M_{\text{Д.Н}} \cdot i^2 - M_{\text{С}}^2}.$$

Тогда выражение для оптимального по быстродействию передаточного отношения имеет вид

$$t_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{\dot{\varphi}_{\text{д.н}}^2 \cdot J_{\text{н}}}{M_{\text{д.н}} \cdot \varphi_0}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1 + M_{\text{с}}^2 \cdot J'_{\text{д}} / (M_{\text{д.н}} \cdot J_{\text{н}})}{\{1 - [M_{\text{с}} / (M_{\text{д.н}} \cdot i)]^2\}^2}}. \quad (8.20)$$

Вычислять  $i_{\text{опт}}$  целесообразно методом последовательного приближения.

Для оценки мощности электродвигателя можно исходить из следующего. Двигатель должен обеспечить определенную номинальную скорость  $\dot{\varphi}_{\text{н}}$  перемещения по координате. Тогда требуемая скорость электродвигателя

$$\dot{\varphi}_{\text{д}} = i \cdot \dot{\varphi}_{\text{н}}. \quad (8.21)$$

Ускорение движения по координате следует ограничивать некоторым допустимым значением  $\ddot{\varphi}_{\text{доп}}$ . Слишком большое значение  $\ddot{\varphi}_{\text{доп}}$  вызовет высокие динамические нагрузки на механизм привода, что приведет к преждевременному выходу из строя всего устройства. С учетом этого момент двигателя равен

$$M_{\text{д}} = \frac{J_{\text{н}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{доп}} + M_{\text{с}}}{i \cdot \eta} + J'_{\text{д}} \cdot i \cdot \ddot{\varphi}_{\text{доп}}. \quad (8.22)$$

Можно принять для выражения (8.22)  $J'_{\text{д}} = J_{\text{н}} / (i^2 \cdot \eta)$ , что обычно близко к действительности. В результате с учетом (8.21) и (8.22) получаем следующее выражение для расчета мощности электродвигателя:

$$P_{\text{д}} = \frac{2J_{\text{н}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{доп}} + M_{\text{с}}}{i \cdot \eta} \dot{\varphi}_{\text{н}}. \quad (8.23)$$

Так как привод в процессе работы выполняет разнообразные циклы, передаточное отношение ПУ, рассчитанное на конкретную величину перемещения, не будет являться оптимальным для других ее значений. Ниже в таблице 8.2 представлены результаты расчета по уравнениям (8.11)–(8.13) влияния отклонения передаточного отношения ПУ от оптимального на время отработки и соответствующие этим передаточным отношениям углы, для которых процесс будет оптимальным.

Таблица 8.2 – Результаты расчета

$i_{\text{опт}}$	1–1,5	1,5–2	1,2	1,5
$T_0 / t_{\text{опт}}, \%$	11	4	3	11,4
$\varphi / \varphi_0$	3,375	1,728	0,588	0,296

Из анализа результатов расчета следует, что даже при значительных изменениях угла отработки отклонение процесса от оптимального невелико, по-

этому передаточное отношение ПУ можно рассчитывать, ориентируясь на какое-либо одно важное с точки зрения быстродействия и наиболее «нагруженное» перемещение. В других случаях – ориентируясь на среднее арифметическое всех перемещений  $\varphi_{0cp}$ , составляющих цикл:

$$\varphi_{0cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi_{0k},$$

где  $\varphi_{0k}$  – угол отработки  $k$ -го перемещения в типовом цикле, состоящем из  $n$  последовательных перемещений.

Момент инерции  $J_{Hk}$  и статические моменты  $M_{Ck}$  нагрузки в каждом из перемещений также могут различаться. При расчете передаточного отношения ПУ следует использовать средние арифметические значения этих величин:

$$J_{H.cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n J_{Hk},$$

$$M_{C.cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n M_{Ck}.$$

Для электропривода с линейным перемещением исполнительного звена во всех расчетных формулах надо заменить моменты инерции нагрузки  $J_H$  массой  $m_H$  (кг) перемещаемых тел; статические моменты  $M_C$  – статическими силами  $F_H$  (Н); характеристики угловых движений исполнительного звена  $\varphi_0$ ,  $\dot{\varphi}_M$ ,  $\ddot{\varphi}_P$ ,  $\ddot{\varphi}_T$  – соответствующими характеристиками линейных движений  $S_0$  (м),  $V_m$  (м/с),  $a_P$  (м/с<sup>2</sup>),  $a_T$  (м/с<sup>2</sup>). В этом случае передаточное отношение ПУ, представляемое как отношение скорости вращения электродвигателя к скорости исполнительного звена, измеряется в радианах на метр.

На основе вышеизложенного можно составить следующую краткую методическую схему выбора электродвигателя и передаточного отношения ПУ:

1) ориентировочный расчет по данным технического задания наибольшей требуемой мощности электродвигателя (формулы (8.18), (8.22));

2) выбор подходящих по мощности электродвигателей с различными значениями  $\dot{\varphi}_{д.н}$  и  $M_{д.н}$ ;

3) расчет передаточных отношений ПУ для каждого электродвигателя (формулы (8.12), (8.17), (8.19));

4) выбор двигателя, обеспечивающего наиболее компактную конструкцию электропривода и требуемое время отработки наиболее важного по быстродействию перемещения или наименьшее время отработки типового цикла перемещений.

### 8.3 Выбор электродвигателя и передаточного отношения редуктора при контурном режиме работы

При контурном режиме работы энергетические параметры электродвигателя и передаточное отношение ПУ должны обеспечивать наибольшие требуемые значения угловой скорости  $\dot{\varphi}_{н.к}$  и углового ускорения  $\ddot{\varphi}_{н.к}$  исполнительного органа и полезного груза. При этом предполагается, что значения  $\dot{\varphi}_{н.к}$  и  $\ddot{\varphi}_{н.к}$  достигаются одновременно (наиболее тяжелый для привода режим). Тогда требуемые максимальные значения скорости  $\dot{\varphi}_{д.м}$ , момента  $M_{д.м}$  и мощности  $P_{д.м}$  электродвигателя определяются следующим образом:

$$\dot{\varphi}_{д.м} = i \cdot \dot{\varphi}_{н.к}, \quad (8.24)$$

$$M_{д.м} = \frac{J_H \cdot \ddot{\varphi}_{н.к} + M_C}{i \cdot \eta} + J'_D \cdot i \cdot \ddot{\varphi}_{н.к}, \quad (8.25)$$

$$P_{д.м} = M_{д.м} \cdot \dot{\varphi}_{д.м} = \left( \frac{J_H \cdot \ddot{\varphi}_{н.к} + M_C}{\eta} + J'_D \cdot i^2 \cdot \ddot{\varphi}_{н.к} \right) \cdot \dot{\varphi}_{н.к}. \quad (8.26)$$

В выражении (8.24)  $\dot{\varphi}_{д.м}$  является требуемой максимальной скоростью электродвигателя при развитии им максимального момента. В уравнения (8.25) и (8.26) подставляются наибольшие значения  $J_H$  и  $M_C$ .

Электродвигатель и передаточное отношение ПУ с энергетической точки зрения выбраны удовлетворительно, если выполняются следующие условия:

$$M_{д.м} \leq M_{д.н}, \quad (8.27)$$

$$\dot{\varphi}_{н.р} = \frac{\dot{\varphi}_{д.р}}{i} \geq \dot{\varphi}_{н.к}, \quad (8.28)$$

где  $\dot{\varphi}_{н.р}$  – скорость перемещения исполнительного органа;

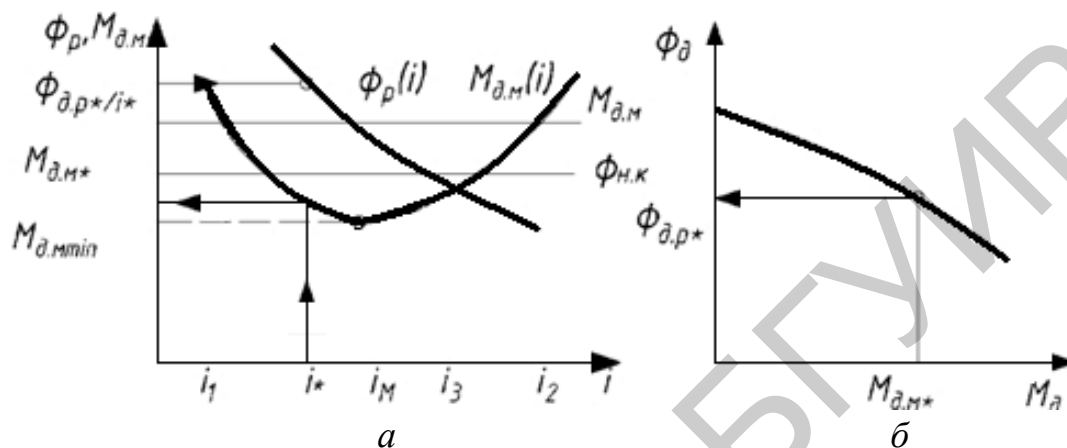
$\dot{\varphi}_{д.р}$  – скорость электродвигателя при максимальном требуемом моменте.

Расчет начинается с определения ориентировочного значения требуемой мощности электродвигателя по выражению (8.26). Если принять  $J'_D \cdot i^2 = J_H \cdot \eta$ , что близко к действительности, то

$$P_D = \frac{2J_H \cdot \ddot{\varphi}_{н.к} + M_C}{\eta} \cdot \dot{\varphi}_{н.к}.$$

Далее выбирают подходящий по мощности электродвигатель, обеспечивающий наиболее компактную конструкцию электропривода.

Определение передаточного отношения целесообразно проводить следующим графоаналитическим методом, который позволяет учесть возможную нелинейность механических характеристик электродвигателя. В соответствии с уравнением (8.24) строится график зависимости максимального значения требуемого момента электродвигателя от передаточного отношения ПУ (на рисунке 8.2, а – кривая  $M_{д.м}(i)$ ), далее проводится прямая, параллельная оси абсцисс и соответствующая номинальному значению момента электродвигателя.



а – определение возможных значений; б – механическая характеристика электродвигателя

Рисунок 8.2 – Выбор передаточного отношения редуктора при контурном режиме работы ПР

Согласно условию (8.27) определяется диапазон возможных значений передаточного отношения редуктора  $i \in [i_1, i_2]$ . Граничные значения  $i_1$  и  $i_2$  находятся из уравнения (8.25) при  $M_{д.м} = M_{д.н}$ :

$$i_{1,2} = \frac{M_{д.н} \pm \sqrt{M_{д.н}^2 - 4J'_д \ddot{\Phi}_{н.к} (J_H \ddot{\Phi}_{н.к} + M_C) / \eta}}{2J'_д \ddot{\Phi}_{н.к}}. \quad (8.29)$$

Минимальное значение  $M_{д.м.мин}$  достигается при передаточном отношении

$$i_M = \sqrt{\frac{J_H \ddot{\Phi}_{н.к} + M_C}{J'_д \ddot{\Phi}_{к \eta}}}$$

и определяется по формуле

$$M_{д.м.мин} = 2 \sqrt{\frac{J_H \ddot{\Phi}_{н.к} + M_C}{\eta}} \cdot J'_д \ddot{\Phi}_{н.к}$$

Из рисунка 8.2, *a* следует, что если для минимального значения максимального динамического момента выполняется условие  $M_{д.м_{\min}} > M_{д.н}$ , то необходимо выбрать другой электродвигатель и повторить расчеты.

Затем определяется диапазон возможных значений передаточного отношения, исходя из условия, определяемого выражением (8.28), обеспечения требуемого значения угловой скорости исполнительного органа и полезного груза. Поскольку максимальный требуемый момент электродвигателя зависит от передаточного отношения ПУ (см. рисунок 8.2, *a*), при нежесткой механической характеристике привода в выражении (8.28) необходимо учитывать, что  $\dot{\varphi}_{д.р}$  также зависит от передаточного отношения ПУ. Строится график зависимости  $\dot{\varphi}_{н.к}$  от  $i$  (см. рисунок 8.2, *a*). Это прямая, параллельная оси абсцисс. Далее строится график зависимости требуемой скорости исполнительного органа  $\dot{\varphi}_p(i)$  от передаточного отношения ПУ. С этой целью для различных значений  $i \in [i_1, i_2]$  по графику  $M_{д.м}(i)$  определяют соответствующие максимальные значения момента двигателя (для  $i = i^*$  (см. рисунок 8.2, *a*) получают  $M_{д.м} = M_{д.м^*}$ ). Для этого значения момента по механической характеристике электродвигателя (см. рисунок 8.2, *б*) находят соответствующие значения его скорости  $\dot{\varphi}_{д.р^*}$ .

Производя деление полученных значений скорости на соответствующие значения  $i$ , подсчитывают требуемую скорость исполнительного органа (для  $i = i^*$ ,  $\dot{\varphi}_{р^*} = \dot{\varphi}_{д.р^*}/i$ , на основании которой строят зависимость  $\dot{\varphi}_p(i)$ . Согласно условию (8.28) по графику  $\dot{\varphi}_p(i)$  определяют верхнюю границу диапазона передаточных отношений ( $i = i_3$ , см. рисунок 8.2, *a*).

Для случая одновременного выполнения соотношений (8.27) и (8.28) находят диапазон возможных значений  $i$  (см. рисунок 8.2)  $i \in [i_1, i_3]$ , из которого выбирают конкретное значение  $i$ .

Чтобы двигатель обладал наименьшим моментом, необходимо соблюдение условия  $i = i_M$ . Если таких значений  $i$  не существует, следует взять другой двигатель и повторить расчеты.

В приведенном расчете не используется возможность перегрузки электродвигателя по моменту. Если это допускается, в выражения (8.27), (8.29) следует вместо  $M_{д.н}$  подставлять  $\lambda_M \cdot M_{д.н}$ , где  $\lambda_M$  – коэффициент перегрузки электродвигателя по моменту, а мощность электродвигателя вычислять по формуле

$$P_d = \frac{2J_H \cdot \dot{\varphi}_{н.к} + M_C}{\eta} \cdot \dot{\varphi}_{н.к}.$$

Последним этапом рассматриваемого энергетического расчета электропривода как при контурном, так и при позиционном режимах работы является проверка электродвигателя на нагрев.

Электродвигатели будут работать, не перегреваясь при циклическом режиме работы промышленного робота, если эквивалентное требуемое средне-



квадратичное значение момента двигателя  $M_{\text{Э}}$  за период рабочего цикла  $t_{\text{Ц}}$  не превышает значения номинального момента двигателя  $M_{\text{Д}}$ :

$$M_{\text{Э}} = \left( \frac{1}{t_{\text{Ц}}} \cdot \int_0^{t_{\text{Ц}}} M_{\text{Д}}^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \leq M_{\text{Д.Н}}, \quad (8.30)$$

где  $M_{\text{Д}}(t)$  – текущее значение требуемого момента электродвигателя.

Как следует из выражения (8.30), при проверке электродвигателя на нагрев необходимо учитывать закон изменения его момента в течение всего периода рабочего цикла, что на начальных этапах проектирования довольно затруднительно. Поэтому проверку целесообразно проводить на этапе моделирования и макетирования устройства.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Пример оформления титульного листа курсового проекта

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

Дисциплина: Проектирование программно-управляемых  
электронно-оптических систем

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту  
на тему

АДАПТИВНАЯ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

БГУИР КП 1-36 04 01 107 ПЗ

Студент: гр. 411101 Данилов В. М.

Руководитель: кандидат технических  
наук, доцент Боженков В. В.

Минск 2019

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Пример оформления задания по курсовому проекту (работе)

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭТТ

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
20 г.

### ЗАДАНИЕ

по курсовому проектированию

Студенту Мицкевичу Евгению Викторовичу

1. Тема проекта Комплекс устройств телемеханики для территориально-распределенных объектов

2. Срок сдачи студентом законченного проекта ХХ \*\*\*\*\* 20ХХ г.

3. Исходные данные к проекту Число КП – 99; число сообщений ТС с КП – 120; число сообщений ТИН с ПУ – 120; тип объекта управления – двухпозиционный; число кодовых команд задания уставок регулятора – 48; расположение объектов – территориально-распределенное; вся информация, поступающая на ПУ, должна вводиться в ЭВМ; защита сообщений ТС, ТИИ, ТУ и КК – кодом с двукратным повторением и дополнительной защитой каждого байта кодом с защитой по паритету; защита сообщений ТИТ и ПСИ – кодом с защитой по паритету; все адреса, передаваемые с ПУ на КП, защищаются информационной обратной связью; сигнализация о неисправности оборудования и линии связи – после трехкратного сбоя; удельная мощность шума  $P_o = 10^{-2}$  Вт/Гц; регистрирующие устройства – аналоговые и цифровые

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, которые подлежат разработке) \_\_\_\_\_

Введение. 1. Выбор структуры системы, линии связи и структуры сигналов.

2. Алгоритм функционирования системы. 3. Разработка структурной схемы системы. 4. Расчет частотных и временных параметров. 5. Выбор и энергетический расчет линии связи. 6. Выбор элементной базы системы. 7. Проектирование принципиальной электрической схемы системы. 8. Системные

расчеты: скорости передачи сообщений, пропускной способности канала связи спектра сигнала в линии связи, расчет помехоустойчивости, расчет надежности. 9. Разработка программного обеспечения. Заключение

5. Перечень графического материала (с точным обозначением обязательных чертежей и графиков)

1. Схема алгоритма работы системы.

2. Схема электрическая структурная.

3. Схема электрическая принципиальная.

6. Консультант по проекту (с обозначением разделов проекта) А. М. Крупский

7. Дата выдачи задания XX xxxxxxxx 20XX г.

8. Календарный график работы над проектом на весь период проектирования (с обозначением сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов):

разделы 1,2 к xx xx – 15 %;

раздел 3 к xx xx – 10 %;

разделы 4,5 к xx xx – 10 %;

разделы 6,7 к xx xx – 35 %;

раздел 8 к xx xx – 5 %;

раздел 9 к xx xx – 10 %;

оформление пояснительной записки и графического материала к xx xx – 15 %.

Защита курсового проекта с xx по xx

РУКОВОДИТЕЛЬ

В.В. Боженков

(подпись)

Задание принял к исполнению

Е.В. Мицкевич

(дата и подпись студента)



## СПИСОК НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

- 1 ГОСТ 2.101–68 ЕСКД. Виды изделий.
- 2 ГОСТ 2.102–68 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов.
- 3 ГОСТ 2.103–68 ЕСКД. Стадии разработки.
- 4 ГОСТ 2.104–68 ЕСКД. Основные надписи.
- 5 ГОСТ 2.105–95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.
- 6 ГОСТ 2.106–96 ЕСКД. Текстовые документы.
- 7 ГОСТ 2.108–68 ЕСКД. Спецификация.
- 8 ГОСТ 2.109–73 ЕСКД. Основные требования к чертежам.
- 9 ГОСТ 2.201–80 ЕСКД. Обозначение изделий и конструкторских документов.
- 10 ГОСТ 2.301–68 ЕСКД. Форматы.
- 11 ГОСТ 2.302–68 ЕСКД. Масштабы.
- 12 ГОСТ 2.303–68 ЕСКД. Линии.
- 13 ГОСТ 2.304–81 ЕСКД. Шрифты чертежные.
- 14 ГОСТ 2.305–68 ЕСКД. Изображения – виды, разрезы, сечения.
- 15 ГОСТ 2.306–68 ЕСКД. Обозначения графические материалов и правила их нанесения на чертежах.
- 16 ГОСТ 2.307–68 ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений.
- 17 ГОСТ 2.314–68 ЕСКД. Указание на чертеже о маркировании и клеймении изделий.
- 18 ГОСТ 2.315–68 ЕСКД. Изображения упрощенные и условные крепежных деталей.
- 19 ГОСТ 2.316–68 ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей технических требований и таблиц.
- 20 ГОСТ 2.412–81 ЕСКД. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.
- 21 ГОСТ 2.413–72 ЕСКД. Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготавливаемых с применением электрического монтажа.
- 22 ГОСТ 2.414–75 ЕСКД. Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и приводов.
- 23 ГОСТ 2.416–68 ЕСКД. Условные изображения сердечников магнитопроводов.
24. ГОСТ 2.417–91 ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей.
- 25 ГОСТ 2.420–69 ЕСКД. Упрощенные изображения подшипников качения на сборочных чертежах.
- 26 ГОСТ 2.701–84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
- 27 ГОСТ 2.743–91 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.

28 ГОСТ 2.745–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Электронагреватели, устройства и установки электротермические.

29 ГОСТ 2.746–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Генераторы и усилители квантовые.

30 ГОСТ 2.747–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений.

31 ГОСТ 2.752–71 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Устройства телемеханики.

32 ГОСТ 2.755–87 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения.

33 ГОСТ 2.756–76 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Воспринимающая часть электромеханических устройств.

34 ГОСТ 2.757–81 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Элементы коммутационного поля коммутационных систем.

35 ГОСТ 2.758–81 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Сигнальная техника.

36 ГОСТ 2.759–82 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники.

37 ГОСТ 2.761–84 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Компоненты волоконно-оптических систем передачи.

38 ГОСТ 2.763–85 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства с импульсно-кодовой модуляцией.

39 ГОСТ 2.764–86 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Интегральные оптоэлектронные элементы индикации.

40 ГОСТ 2.765–87 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Запоминающие устройства.

41 ГОСТ 2.766–88 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Системы передачи информации с временным разделением канала.

42 ГОСТ 2.767–89 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Реле защиты.

43 ГОСТ 2.768–90 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Источники электрохимические, электротермические и тепловые.

44 ГОСТ 2.770–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Элементы кинематики.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Аксенов, А. И. Вакуумные и плазменные приборы и устройства. Методич. указания по курс. проектированию : учеб. пособие / А. И. Аксенов, А. Ф. Злобина, Н. Г. Панковец. – Томск : ТУСУР, 2014. – 66 с.
- [2] Башенко, В. В. Электронно-лучевые установки / В. В. Башенко. – Л. : Машиностроение, 1972. – 168 с.
- [3] Назаренко, О. К. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко. – Киев : Наукова думка, 1965. – 125 с.
- [4] Вендик, О. К. Корпускулярно-фотонная технология / О. К. Вендик, Ю. Н. Горин, В. Ф. Попов. – М. : Высш. шк., 1984. – 240 с.
- [5] Попов, В. Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии / В. Ф. Попов, Ю. Н. Горин. – М. : Высш. шк., 1988. – 252 с.
- [6] Шерстнев, Л. Г. Электронная оптика и электронно-лучевые приборы / Л. Г. Шерстнев. – М. : Энергия, 1971. – 357 с.
- [7] Бадьянов, Б. Н. Сварочные процессы в электронном машиностроении : учеб. пособие / Б. Н. Бадьянов, В. А. Давыдов, С. Г. Паршин. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 268 с.
- [8] Жигарев, А. А. Электронно-лучевые приборы / А. А. Жигарев. – М. : Энергия, 1965. – 335 с.
- [9] Молоковский, С. И. Электронно-оптические системы приборов СВЧ / С. И. Молоковский, А. Д. Сушков. – М. : Энергия, 1965. – 112 с.
- [10] Молоковский, С. И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С. И. Молоковский, А. Д. Сушков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
- [11] Бонштедт, Б. Э. Фокусировка и отклонение пучков / Б. Э. Бонштедт, М. Г. Маркович. – М. : Сов. радио, 1967. – 272 с.
- [12] Жигарев, А. А. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы / А. А. Жигарев, Г. Г. Шамаева. – М. : Высш. шк., 1982. – 462 с.
- [13] Алямовский, И. В. Электронные пучки и электронные пушки / И. В. Алямовский. – М. : Сов. радио, 1966. – 452 с.
- [14] Соболев, В. Д. Физические основы электронной техники / В. Д. Соболев. – М. : Высш. шк., 1979. – 448 с.
- [15] Машиностроение. Энциклопедия. Т. Ш-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / К. В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2000. – 744 с.
- [16] Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы / В. Л. Соломахо [и др.]. – Минск : Выш. шк., 1988. – 272 с.
- [17] Справочник конструктора-приборостроителя. Детали и механизмы приборов / В. Л. Соломахо [и др.]. – Минск : Выш. шк., 1990. – 440 с.
- [18] Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович [и др.] ; под общ. ред. К. Н. Явленского, Б. П. Тимофеева, Е. Е. Чаадаевой. – Л. : Машиностроение, 1989. – 792 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .....	4
1.1 Задачи курсового проектирования.....	4
1.2 Тематика курсовых проектов .....	4
1.3 Организация курсового проектирования .....	5
1.4 Задание на курсовое проектирование.....	6
2 ВИДЫ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ .....	7
2.1 Комплектность конструкторских документов.....	7
2.2 Обозначение изделий и конструкторских документов .....	8
2.3 Правила выполнения основных конструкторских документов.....	10
2.4 Схемы.....	14
2.5 Спецификация.....	26
3 УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	29
3.1 Основные технические требования и структура установок.....	29
3.2 Основные узлы термических электронно-лучевых установок .....	31
4 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК .....	38
4.1 Расчет слаботочных низкопервечанских пушек.....	38
4.2 Расчет высокопервечанских пушек .....	41
4.3 Катоды .....	46
4.3.1 Расчет идеального катода прямого накала .....	46
4.3.2 Расчет реального прямонакального катода .....	48
4.3.3 Расчет катода косвенного канала.....	49
4.3.4 Приближенный расчет подогревателей .....	50
4.3.5 Конструкции катодов .....	51
5 СИСТЕМЫ ФОКУСИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА.....	54
5.1 Электронные линзы.....	54
5.1.1 Линза в виде диафрагмы с круглым отверстием.....	54
5.1.2 Одиночная линза .....	56
5.1.3 Иммерсионные линзы .....	57
5.1.4 Иммерсионный объектив.....	58
5.2 Магнитные линзы .....	60
5.3 Аберрации фокусирующих систем.....	66
5.3.1 Сферическая аберрация .....	66
5.3.2 Хроматические аберрации.....	67
5.3.3 Влияние пространственного заряда.....	68
5.4 Конструирование «коротких» осесимметричных фокусирующих систем.....	69
6 СИСТЕМЫ ОТКЛОНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА.....	71
6.1 Электростатические отклоняющие системы .....	71
6.2 Электромагнитные отклоняющие системы .....	73

6.3 Системы с параллельно складываемыми магнитными полями .....	75
6.4 Системы с последовательным сложением магнитных полей .....	76
7 РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ.....	78
7.1 Основные параметры системы микроперемещений .....	78
7.2 Расчет критической скорости, резонансной частоты и затухания .....	80
7.3 Расчет параметров прерывистого движения.....	81
7.4 Обеспечение требуемой точности перестановки .....	82
8 ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА .....	86
8.1 Структура и классификация электроприводов .....	86
8.2 Выбор электродвигателя при позиционном режиме работы .....	87
8.3 Выбор электродвигателя и передаточного отношения редуктора при контурном режиме работы.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А Пример оформления титульного листа курсового проекта .....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Пример оформления задания по курсовому проекту (работе).....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ В Пример оформления ведомости курсового проекта (работы).....	101
Список нормативно-технической документации .....	102
Список использованных источников .....	104

*Учебное издание*

**Боженков Владимир Владимирович**  
**Шахлевич Григорий Михайлович**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ  
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.  
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 20.06.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 6,39. Уч.-изд. л. 6,3. Тираж 30. Заказ 359.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск