МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет мехатроники и автоматизации

Кафедра электротехнических комплексов

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ»

на тему «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА 27 В»

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Выполнил:  Студент гр. ЭМ-34 | Подпись, дата выполнения: | Отметка о защите: |
| Червоненко А.П. | \_\_\_\_\_\_\_\_ "\_\_\_\_"\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2016 г. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |
| Проверил:  Ассистент |  | Отметка о принятии: |
| Абрамов Е.Ю. |  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |

г. Новосибирск 2016

Содержание

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc447645248)

[1. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО АППАРАТА 4](#_Toc447645249)

[2. РАСЧЁТ КОММУТИРУЮЩИХ КОНТАКТОВ 6](#_Toc447645250)

[2.1. Выбор материала и конструктивных форм коммутирующих контактов 6](#_Toc447645251)

[2.2. Расчёт коммутирующих контактов 6](#_Toc447645252)

[2.3. Ток сваривания 10](#_Toc447645253)

[2.4. Раствор и провал контактов 10](#_Toc447645254)

[2.5. Выбор и описание дугогасительной системы контакторов 11](#_Toc447645255)

[3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА 12](#_Toc447645256)

[3.1. Анализ формы конструкции электромагнита, выбор материала магнитопровода и электромагнитных нагрузок 12](#_Toc447645257)

[3.2. Определение размеров элементов магнитопровода и обмоточного пространства 13](#_Toc447645258)

[3.2.1. Определение размеров элементов магнитопровода 13](#_Toc447645259)

[3.2.2. Определение площади обмоточного пространства и сторон сечения обмотки. 15](#_Toc447645260)

[3.3. Определение конструкционных размеров и обмоточных данных катушки 16](#_Toc447645261)

[3.3.1. Определение размеров катушки электромагнита 16](#_Toc447645262)

[3.3.2. Размеры, характеризующие пространство, занятое проводниками в поперечном сечении электромагнита 17](#_Toc447645263)

[3.3.3. Определение длины сердечника электромагнита с внешним притягиваемым якорем 18](#_Toc447645264)

[3.3.4. Определение размеров и площади сечения ярма (основания скобы) 18](#_Toc447645265)

[3.3.5. Определение площади и размеров сечения якоря 19](#_Toc447645266)

[3.3.6. Определение сечения и размеров скобы 20](#_Toc447645267)

[3.4. Выбор величин рабочих и нерабочих воздушных зазоров и определение их расчетных площадей 20](#_Toc447645268)

[3.5. Разработка эскиза электромагнита 20](#_Toc447645269)

[4. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА 22](#_Toc447645270)

[4.1. Составление электрической схемы замещения 22](#_Toc447645271)

[4.2. Определение магнитных проводимостей воздушных зазоров и промежутков 22](#_Toc447645272)

[4.3. Расчёт коэффициентов рассеяния 28](#_Toc447645273)

[4.4. Расчёт магнитной цепи по участкам 29](#_Toc447645274)

[4.5. Построение тяговых характеристик 33](#_Toc447645275)

[СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 38](#_Toc447645276)

# ВВЕДЕНИЕ

Цель курсовой работы – более глубокое освоение основных разделов теоретического курса, предусмотренного дидактическими единицами ГОСа. Выполнение курсовой работы обусловливает применение полученных теоретических знаний для решения конкретных практических задач, привитие навыков самостоятельного мышления, умелого использования справочной, учебной и нормативной литературы.

Выполнение курсовой работы является инженерной комплексной задачей, которая требует понимания зависимостей между основными параметрами аппарата, его характеристиками, конструкцией и размерами.

Точный расчет в электрических аппаратах сложен в связи с нелинейностью и переменной проводимости в электромагнитах при срабатывании. Поэтому при проектировании электрических аппаратов особое внимание уделяется разработке конструктивной формы и размеров магнитной системы. [1, с. 1].

В данной курсовой работе будет рассмотрено вспомогательное реле, а именно промежуточное реле. Под реле понимают такой электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра. Хотя бы один из этих параметров должен быть электрическим [2, с. 337].

# 1. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО АППАРАТА

*Таблица 1.1 — Исходные данные*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Номинальное напряжение катушки** | **Uн** | **27** | **В** |
| **Напряжение срабатывания** | **Uсрб** | **1,01Uн** | **В** |
| **Величина воздушного зазора при отпущенном якоре** | **** | **3,1.10-3** | **м** |
| **Приведенная начальная противодействующая сила** | **F’max.нач** | **2,38** | **H** |
| **Номинальный ток контакта** | **Iн.к** | **4,74** | **А** |
| **Магнитная система** | **Клапанная** | | |
| **Тип аппарата** | **Реле промежуточное** | | |

На основании исходных данных выбрана следующая конструкция промежуточного реле, которая представлена на рисунке 1.1.

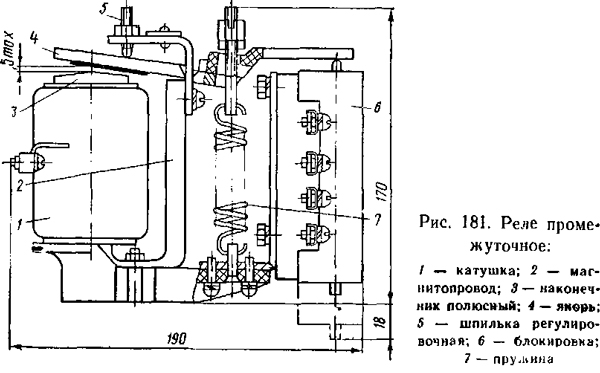
****

Рисунок 1.1 - Промежуточное реле и его общее устройство.

Обозначения: 1 – катушка; 2 – магнитопровод; 3 – наконечник полюсный; 4 – якорь; 5 – шпилька регулировочная; 6 – блокировка; 7 – пружина

*Принцип работы.* Конструкция устройства может варьироваться в зависимости от его назначения и производителя (Omron, VDC, CAD, РЭП15). Рассмотрим самый простой вариант. Стандартное двухпозиционное вспомогательное реле состоит из электромагнитной катушки, оснащенной сердечником. К ней подключается постоянный или переменный ток нагрузки в зависимости от рабочей сети. Когда в катушке появляется напряжение, происходит замыкание рабочих подвижных контактов с неподвижными. Они установлены на корпусе над колодкой. Катушка управляет ими – они могут изменять свое положение и от этого может изменяться принцип питания.

*Назначение* реле промежуточного типа:

1. Для замыкания или размыкания отдельных и независимых друг от друга цепей;
2. Для замедления защитной реакции при необходимых высоких нагрузках;
3. С целью контроля основного устройства в условиях высокого напряжения [3].

[Промежуточные](http://www.elektropole.ru/index.php?categoryID=112) реле применяются для передачи команд исполнительными элементами в цепи замыкания катушки, методом коммутации электрических цепей различными переключающими контактами. Широкое распространение промежуточное реле имеет в цепях управления при выполнении переключения цепей постоянного и переменного электрического тока. Также оно применяется в разнообразных устройствах автоматизации и управления оборудованием и всевозможными производственными процессами, а также в сфере телекоммуникации. Реле предназначены для выполнения коммутации во вспомогательных цепях и цепях управления, защиты и сигнализации.

*Область применения.* Промежуточное реле служит как вспомогательное устройство и применяется, когда нужно провести:

* замыкание или размыкание одновременно нескольких независимых цепей - размножить контакты (так, к примеру, одним контактом отключаем выключатель, а другим - выдаем аварийный сигнал в схему сигнализации);
* управление реле большей мощности, коммутриущим цепи с большими токами (так, к примеру, требуется провести подачу напряжения на включающий соленоид привода выключателя, при чем ток включения достигнет 63 ампер, однако с помощью одного промежуточного реле выполнить такую операцию не представляется возможным, потому вначале нужно подать напряжение на катушку промежуточного реле, после чего уже своими контактами включит контактор большей мощности, что скоммутирует уже большие токи;
* создание искусственного замедления действия релейной защиты [6].

# 2. РАСЧЁТ КОММУТИРУЮЩИХ КОНТАКТОВ

## **2.1. Выбор материала и конструктивных форм коммутирующих контактов**

Материал контакта должен обладать высокой электропроводностью для уменьшения потерь мощности в замкнутом состоянии, уменьшения нагрева контактов и устранения опасности их приваривания. В природе не существует материала, удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к материалам.

При номинальном токе контакта Iн.к до 5А целесообразно применять точечный контакт, который обеспечивает высокое удельное нажатие, и следовательно, малое контактное сопротивление даже в случае малых сил контактного нажатия.

При данном значении номинального тока контакта Iн.к применяются цветные металлы: платина, золото, серебро, медь. В качестве релейных контактов целесообразно применить мостиковые контакты с напайками сплава серебро-вольфрам СВ70 [1; с. 6].

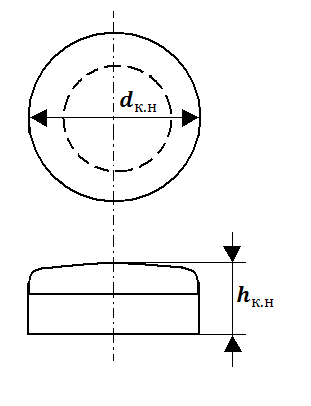
## **2.2. Расчёт коммутирующих контактов**

Коммутирующие контакты должны обеспечивать отделение одной контактной поверхности от другой; чтобы электрическая связь между ними была полностью прервана. Выберем стыковые (торцовые) контакты (контактные поверхности таких контактов перпендикулярны направлению движения контактов) с точечной формой контактной поверхности (одна точка контактирования – nk=1).

*Определение основных размеров контактов.*

При определении размеров контактов ориентируются на сечение токоведущего контура контактной системы. Основными элементами коммутирующего контакта являются контакт-детали. В данном случае выбрана цилиндрическая рабочая поверхность (она припаивается к основной контакт-детали).

Диаметр и толщина напаек выбирается в зависимости от величины номинального тока.

  
Рисунок 2.1 – Контактные накладки.

При токе меньше 5А высота контакта [1, с. 6]. Определим диаметр контакта по следующему выражению:

(2.1)

где - удельное сопротивление материала проводника,; - коэффициент добавочных потерь (для электромагнитов постоянного тока kд = 1); - удельный коэффициент теплоотдачи с поверхности токоподводящих проводников; - допустимое превышение температуры тела контакта.

(2.2)

где - удельное электрическое сопротивление материала шины при 20 ; - температурный коэффициент электрического сопротивления, материала контактов; - наибольшая допустимая температура нагрева материала.

Подставив данные, определим величину диаметра:

Определим длину окружности и сечение контактной площадки:

(2.3)

(2.4)

*Сила нажатия контактов, относящаяся к одной контактной площадке:*

(2.5)

где число Лоренца, ; твердость по Виккерсу (твердость по Виккерсу близка к твердости по Бринеллю), коэффициент удельной теплопроводности, ; температура металла тела контакта; температура точки касания, .

(2.6)

где температура окружающей среды, .

Подставив данные, найдём численное значение силы:

Данное значение удовлетворяет принятым значениям силы нажатия [1; с. 66].

*Полная сила нажатия*, приложенная к контактам:

(2.7)

Полученное значение полной конечной силы нажатия должно быть не ниже норм, установившихся на практике:

(2.8)

где - величина удельного нажатия для ряда современных серий электрических аппаратов, приходящегося на один электрический контакт, работающий в воздухе и масле.

Данное условие выполняется –

*Величина начального нажатия*, соответствующая моменту касания контактов при замыкании или размыкании, принимается равной:

(2.9)

*Переходное сопротивление* сильноточных коммутирующих контактов определяется сопротивлением стягиванием линий тока в площадках соприкосновения и сопротивлением пленок и загрязнений на поверхности контактов. При протекании тока через замкнутые контакты и вследствие воздействия дуги при коммутациях переходное сопротивление повышается:

(2.10)

где коэффициент, учитывающий материал и состояние поверхности контакта; – коэффициент, учитывающий уменьшение температуры по мере её удаления от площадок касания; допустимая температура материала контактов; коэффициент формы контактной поверхности: для точечного контакта.

Подставим данные:

*Падение напряжения* в переходном сопротивлении коммутирующих контактов

(2.11)

Данное значение напряжения не превышает значения где напряжение рекристаллизации серебра:

## **2.3. Ток сваривания**

В режиме короткого замыкания, продолжительность которого не превышает нескольких секунд, через контакты аппаратов проходит ток, в 10…20 раз превосходящий значение тока номинального режима. Из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки возрастает практически мгновенно и может достигать температуры плавления металла контактов. Между контактами появляются определенные силы сцепления, приводящие к свариванию контактов.

Начальным током сваривания Iн.св. называют величину тока, прохождение которого по контактам приводит к расплавлению площадок соприкосновения; при этом усилие, разводящее контакты, не может преодолеть силы сцепления сварившихся контактов. При инженерных расчетах ориентировочно начальный ток сваривания коммутирующих контактов определяют по расчетной зависимости Г.В. Буткевича, которая связывает Iн.св. и силу нажатия контактов:

(2.12)

где – эмпирический коэффициент сваривания, учитывающий физические свойства материала контакта и его тип. При времени импульса тока до 5 с и контактов серебро – серебро, сплавов серебра и контактов из металлокерамики на основе серебра коэффициент сваривания можно принять равным – .

Значение Iн.св. не должно быть меньше значения ударного тока Iуд., который определяется через ток короткого замыкания следующим образом:

(2.13)

(2.14)

Условие выполняется.

## **2.4. Раствор и провал контактов**

Наличие мостикового контакта с двумя разрывами позволяет уменьшить ход контакта, сохраняя суммарную величину раствора. В этом случае обычно принимается раствор 3 — 5 мм на каждый разрыв. Чрезмерное уменьшение раствора (меньше 3 — 5 мм) обычно не делается, так как погрешности при изготовлении отдельных деталей могут существенно повлиять на величину раствора [5].

Примем .

Выше определены следующие размеры контактов:

.

Величина провала определяется величиной максимального износа контактов. Для контактов с накладками – до полного износа накладок, полный износ – суммарная толщина накладок подвижного и неподвижного контактов.

Величина провала определена как:

(2.15)

.

Провал и раствор определяют меру износа контактов и обеспечивают постоянное нажатие их в процессе износа.

Полное перемещение подвижного контакта равно сумме провала и раствора контактов и называется ходом контакта.

Величина полного перемещения равна:

(2.16)

## **2.5. Выбор и описание дугогасительной системы контакторов**

В цепях постоянного тока дуга возникает между контактами при разрыве цепи. При расцеплении контактов вначале расстояние между контактами мало и между ними зарождается дуга, условием возникновения которой являются определённые значения напряжения и тока коммутирующих контактов. То есть, полученные выше значения и не должны превышать соответствующих значений для данного материала (серебро-вольфрам СВ70), [7]:

Так как проверка по току не выполняется (критическое значение превышено), то возможен дуговой разряд, отрицательно влияющий на работу и срок службы контактов. Для того, чтобы этого не произошло, включим параллельно контактам реле RC-цепь.

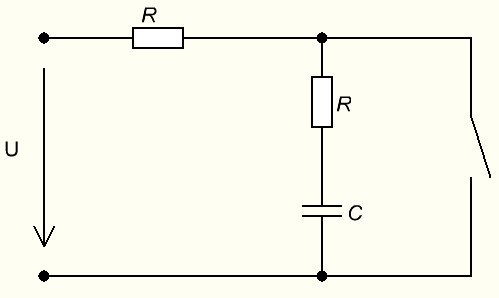


Рисунок 2.2 – RC-цепь.

Конденсатор при размыкании контактов реле начинает заряжаться. Если время заряда конденсатора до напряжения зажигания дуги на контактах выбирается большим, чем время расхождения контактов на расстояние, при котором дуга не может возникнуть, то контакты защищены от появления дуги [8].

# 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

*Электромагнитным механизмом* называется электромагнитная система, в которой при изменении или перераспределении магнитного потока происходит перемещение подвижной части системы, совершающей полезную работу.

## **3.1. Анализ формы конструкции электромагнита, выбор материала магнитопровода и электромагнитных нагрузок**

Для изготовления магнитопроводов электромагнитов постоянного тока применяют магнитомягкие низкоуглеродистые стали. Для маломощных электромагнитов (реле) целесообразно применять магнитомягкие низкоуглеродистые низкокоэрцитивные электротехнические стали марок Э, ЭА и ЭАА. Помимо малой величины задерживающей (коэрцитивной) силы эти стали имеют высокое значение максимальной относительной магнитной проницаемости.

*Электромагнитными нагрузками*, определяющими размеры элементов электромагнитной системы и электрического аппарата в целом, являются магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре *Вδот*, магнитная индукция в элементах магнитопровода *Вст*, плотность тока в проводниках обмотки *j*.

Конструктивный фактор определяется по формуле:

(3.1)

где начальное тяговое усилие, развиваемое электромагнитом; .

По полученной величине определяем значение .

## **3.2. Определение размеров элементов магнитопровода и обмоточного пространства**

### *3.2.1. Определение размеров элементов магнитопровода*

*Площадь сечения сердечника* при любом количестве рабочих воздушных зазоров *nδ* и равномерном магнитном поле на основании уравнения электромагнитной силы Максвелла определится как

(3.2)

где магнитная проницаемость воздуха; расчётная электромагнитная сила, при которой электромагнит срабатывает; магнитная индукция в рабочем зазоре при отпущенном якоре.

*Площадь сечения торца без полюсного наконечника*

(3.3)

где количество воздушных зазоров.

*Диаметр круглого сердечника электромагнита постоянного тока*

(3.4)

где сечение сердечника (.

*Размер выступающей из катушки части*

(3.5)

*Определение намагничивающей силы обмотки электромагнита постоянного тока*

Величина н.с. обмотки электромагнита постоянного тока, необходимая для срабатывания электромагнита:

(3.6)

где сумма зазоров, зависящая от конструктивной формы, величина рабочего зазора при отпущенном якоре.

*Для катушки параллельного включения н.с. обмотки*

(3.7)

где напряжение срабатывания.

*Намагничивающая сила, приходящаяся на один рабочий воздушный зазор,* при отпущенном якоре

(3.8)

*Намагничивающая сила обмотки при нескольких катушках –* всей обмоточной структуры

(3.9)

где количество катушек магнитопровода.

### *3.2.2. Определение площади обмоточного пространства и сторон сечения обмотки.*

*Определение площади поперечного сечения обмоточного пространства катушки* (в расчете на одну катушку)

(3.10)

где коэффициент, характеризующий максимальное значение напряжения, при котором температура обмотки не должна превосходить допустимую; в наиболее распространённых случаях коэффициент перегрузки по току, характеризующий нагрузочную способность токоведущей части аппарата (для продолжительного режима); плотность тока в проводниках обмотки, ограниченная температурой нагрева; коэффициент заполнения обмоточного пространства зависит от марки выбранного обмоточного провода, состоящего из трех коэффициентов

(3.11)

где коэффициент формы сечения проводника коэффициент неравномерности укладки; коэффициент изоляции проводника.

*Высота и длина обмоточного пространства*

где относительная длина обмоточного пространства.

(3.12)

(3.13)

На основании анализа электромагнитов постоянного тока с внешним прямоходовым якорем приведённое ниже отношение соответствует малым конструкциям:

(3.14)

## **3.3. Определение конструкционных размеров и обмоточных данных катушки**

В электромагнитах постоянного тока применяют большей частью катушки цилиндрической формы. Выберем катушку *каркасного* типа. Каркасные катушки применяются в небольших электромагнитах с обмоткой из относительно тонкого провода.

### *3.3.1. Определение размеров катушки электромагнита*

*Длина и высота каркасной катушки*

(3.15)

(3.16)

где толщина изоляционной шайбы; толщина корпусной изоляции катушки; технологический припуск по длине (может быть обусловлен выступающими частями втулки сборного каркаса); технологический припуск по высоте (учитывает выпучивание витков обмотки в средней по длине части катушки и наплывы).

### *3.3.2. Размеры, характеризующие пространство, занятое проводниками в поперечном сечении электромагнита*

*Внутренний и наружный диаметры круглой обмотки*

(3.17)

где толщина внутренней изоляции стержня сердечника.

(3.18)

*Внутренний и внешний диаметры цилиндрической катушки*

(3.19)

(3.20)

*Площадь наружной поверхности катушки цилиндрической формы*

(3.21)

*Площадь торцовой поверхности катушки цилиндрической формы*

(3.22)

*Площадь внутренней поверхности катушки цилиндрической формы*

(3.23)

### *3.3.3. Определение длины сердечника электромагнита с внешним притягиваемым якорем*

В электромагнитах без полюсного наконечника

(3.24)

### *3.3.4. Определение размеров и площади сечения ярма (основания скобы)*

*Ширина ярма (основания) скобы* для цилиндрической катушки

(3.25)

*Толщина ярма (основания)* цилиндрического магнитопровода

(3.26)

где толщина скобы.

*Площадь сечения ярма (основания)*

(3.27)

### *3.3.5. Определение площади и размеров сечения якоря*

*Площадь сечения якоря*

(3.28)

*Ширина якоря* для сердечника без полюсного наконечника

(3.29)

*Ширина якоря* должна соответствовать условию ширина скобы.

Данное условие выполняется.

*Толщина якоря*

(3.30)

*Длина внешнего плоского якоря*  и *длина ярма (основания)*  принимается при разработке эскиза электромагнита (клапанного типа):

(3.31)

*Длина внешнего плоского якоря* (для электромагнита клапанного типа без полюсного наконечника)

(3.32)

### *3.3.6. Определение сечения и размеров скобы*

*Сечение скобы* принимается равной сечению сердечника

*Ширина скобы*

*Толщина* скобы должна быть достаточной с точки зрения получения оптимальной магнитной проводимости нерабочего воздушного зазора в месте сочленения сердечника и скобы

*Длина скобы* (для электромагнита без полюсного наконечника)

(3.33)

## **3.4. Выбор величин рабочих и нерабочих воздушных зазоров и определение их расчетных площадей**

К рабочим воздушным зазорам относят эквивалентный по магнитной проводимости расчетный воздушный зазор , обусловленный технологией обработки деталей.

При шлифовке поверхностей деталей из низкоуглеродистой стали марок Э, ЭА (армко) по 8–9 классу шероховатости при примем

К нерабочим воздушным зазорам электромагнитов относятся:

*штифт или круглая пластина «отлипания»*, устанавливаемые между якорем и сердечником, размером

*зазор между плоским якорем и скобой* (получено из эскиза), который изменяется от величины, равной , до наибольшей величины при полностью отпущенном якоре . За расчетные величины принимаются зазоры в середине скобы в месте расположения средней линии магнитного потока.

## **3.5. Разработка эскиза электромагнита**

На основании проведенных расчетов выполнен эскиз общего вида катушки как узла электромагнита и электромагнита в целом.

ЭСКИЗ

# 4. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

## **4.1. Составление электрической схемы замещения**

При разветвленном магнитопроводе по аналогии с электрической цепью составляется схема замещения магнитной цепи. Магнитный поток Ф и намагничивающая сила соответствуют электрическому току I и ЭДС E. Участки магнитопровода и воздушных промежутков представляются как сопротивления, которые считаются неизменными вдоль участка.

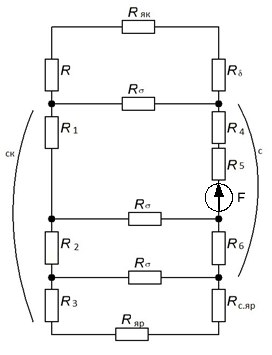


Рисунок 4.1 – Электрическая схема замещения.

## **4.2. Определение магнитных проводимостей воздушных зазоров и промежутков**

В соответствии с разработанным эскизом электромагнита по геометрическим размерам, полученным в процессе предварительного расчета, и его рабочих и нерабочих зазоров, по формулам, выведенным аналитически и полученным на основании математической обработки экспериментальных данных определяют магнитную проводимость воздушных зазоров и промежутков.

*Магнитные проводимости воздушных зазоров и промежутков для электромагнитов с внешним притягивающимся якорем.*

*Магнитная проводимость рабочего зазора между торцом цилиндрического сердечника и наклоненного под углом плоским якорем*

(4.1)

где поправочный коэффициент, определяемый следующим образом:

(4.2)

(4.3)

здесь величина нерабочего воздушного зазора между якорем и скобой;

(4.4)

*Производная проводимости для определения магнитного потока*

(4.5)

*Магнитная проводимость воздушных промежутков в месте сочленения сердечника и основания скобы (ярма)*

(4.6)

где диаметр посадки (принимается с учётом обеспечения жесткости крепления;

зазор в месте сочленения сердечника и скобы, зависящий от конструкции сочленения.

*Магнитная проводимость воздушных промежутков – путей потока рассеяния,* когда н.с. распределена по сердечнику, магнитопровод не насыщен, достаточная протяженность воздушных промежутков. Поле рассеяния является плоскопараллельным и равномерно распределенным по сердечнику и обмотке.

В плоскостях, перпендикулярных оси цилиндров, картина поля потока рассеяния представляет собой пучок окружностей, которыми в данном случае являются линии магнитной индукции и эквипотенциальные линии.

*Магнитная проводимость потока рассеяния участков цепи для цилиндра, параллельного плоскости*

(4.7)

где протяжённость потока рассеяния, радиус цилиндра.

(4.8)

(4.9)

*Магнитная проводимость нерабочего воздушного зазора* без учета выпучивания магнитного потока

(4.10)

где величина нерабочего воздушного зазора.

(4.11)

*Удельная магнитная проводимость потока рассеяния*, отнесенная к единице длины участка при равномерно распределенной по сердечнику н.с.

(4.12)

где длина участка магнитной проводимости рассеяния.

*Суммарная проводимость двух и более воздушных зазоров и промежутков рассеяния* магнитной цепи магнитопровода с внешним притягиваемым якорем (без учета магнитной проводимости ферромагнитных участков).

Магнитные проводимости воздушных зазоров и промежутков рассеяния, расположенные последовательно, складываются как параллельно соединенные сопротивления.

*Суммарная магнитная проводимость между якорем и сердечником* (без полюсного наконечника)

(4.13)

*Суммарная магнитная проводимость воздушных зазоров и промежутков, расположенных со стороны якоря*

(4.14)

*Максимальный магнитный поток ,* разделяющий магнитную цепь на части, каждая из которых содержит воздушный зазор

Расчетные длины сердечника, в которых расположены воздушные зазоры

(4.15)

где участки, рассчитывающиеся по следующим формулам:

(4.16)

(4.17)

(4.18)

*Суммарная магнитная проводимость воздушных промежутков магнитопровода*

(4.19)

где магнитные проводимости рассчитывающиеся по следующим формулам:

(4.20)

(4.21)

(4.22)

*Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров и промежутков потока рассеяния, суммарной проводимости и производной проводимости* сведён в табл. 4.1.

*Таблица 4.1 — Магнитные проводимости воздушных зазоров и промежутков*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  | 6,295 | 9,783 | 85,565 | 1027,3 |
|  |  | 1,272 | 4,111 | 792,8 | 131700 |
|  |  | 6,287 | 9,764 | 84,09 | 848,3 |

Продолжение таблицы 4.1.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 12,775 | 12,775 | 12,775 | 12,775 |
|  |  | 4,867 | 4,867 | 4,867 | 4,867 |
|  |  | 6,295 | 9,783 | 85,56 | 1027 |
|  |  | 12,154 | 15,626 | 89,86 | 853,3 |
|  |  | 7,102 | 10,583 | 84,99 | 849,9 |
|  |  | 2,127 | 4,495 | 250,9 | 27290 |

## **4.3. Расчёт коэффициентов рассеяния**

При определении коэффициентов рассеяния магнитного потока магнитное сопротивление ферромагнитных участков с целью упрощения принимается независимым от величины проходящего потока, а обмотка – равномерно распределенной по сердечнику. Коэффициент рассеяния представляет собой отношение полной величины потока, проходящего через рассматриваемое сечение сердечника на его длине , к величине потока, проходящего через ближайший последовательно расположенный в цепи воздушный зазор. Когда воздушные зазоры (рабочие и нерабочие) расположены с двух сторон обмотки, магнитная система разделяется на две отдельные части, причем в каждой части системы имеется поток рассеяния, обусловленный коэффициентом рассеяния этой части. Так, магнитные цепи с обмотками постоянного тока рассчитываются при использовании .

*Разделение н.с. обмотки*  на части, пропорциональные длине участков, на которые делится длина обмотки, местоположением для магнитной системы электромагнита, учитывая, что убывание потока на участке 2 – 3 происходит незначительное

(4.23)

(4.24)

*Коэффициент рассеяния* при

Два последовательных зазора

(4.25)

Один зазор

(4.26)

## **4.4. Расчёт магнитной цепи по участкам**

Расчет выполняется с использованием коэффициентов рассеяния и кривой намагничивания и построения характеристик. Для выполнения расчета необходимо иметь эскиз магнитопровода, разделенного на участки магнитной цепи, соответствующие схеме замещения, а также уточненное значение магнитного потока в максимальном рабочем зазоре ().

Расчет магнитной цепи по участкам совмещают с построением силовых характеристик при .

Расчеты сведены в табл. 4.2. в следующем порядке:

* по потоку и коэффициентам рассеяния определим значения магнитного потока на всех участках магнитопровода и внесём в расчетную таблицу;
* определим значения величин н.с., приходящихся на каждый участок магнитной цепи (для воздушных зазоров по формуле ; для стальных участков магнитопровода находим индукцию в них , на основании которой по кривой намагничивания материала магнитной системы определим напряженность магнитного поля , и далее определим значение н.с. на стальных участках );
* сумма величин н.с., определенных в предыдущем пункте, представляет полную н.с. обмотки , необходимую для получения потока , требуемого для создания электромагнитной силы, равной приведенному значению механической критической силы, т.е. . Так определим первую точку (2) силовой характеристики при ;
* для построения характеристики зададимся двумя произвольными значениями усилий (при условии ), по (5.1) найдем необходимые величины магнитного потока в рабочем зазоре, а по этим величинам и определяют н.с. обмотки , необходимую для получения усилия ; таким образом, получим дополнительные точки для построения силовой характеристики при величине воздушного зазора ;
* количество необходимых для расчета силовых характеристик расчетных точек должно быть не менее 3: для величины максимального рабочего воздушного зазора при отпущенном якоре ; для критического зазора ; для величины рабочего воздушного зазора, при котором якорь касается стержня магнитопровода ; для величины воздушного рабочего зазора при притянутом якоре ;
* для построения четырех силовых характеристик необходимо рассчитать 12 точек;
* на основании полученных результатов построим семейство силовых характеристик заданной системы.

*Расчёт точки характеристики для и :*

*Рабочий зазор 1*

(4.27)

(4.28)

*Сердечник:*

*сечение 1*

(4.29)

По значению индукции определим, используя кривую намагничивания, напряженность

Аналогично:

*сечение 2*

(4.30)

*сечение 3*

(4.31)

(4.32)

*Сердечник – скоба*

(4.33)

*Сердечник – участок 0*

(4.34)

По значению индукции определим, используя кривую намагничивания, напряженность

(4.35)

*Скоба:*

*сечение 1*

(4.36)

По значению индукции определим, используя кривую намагничивания, напряженность

Аналогично:

*сечение 2*

(4.37)

*сечение 3*

(4.38)

(4.39)

*Скоба – якорь*

(4.40)

*Якорь*

(4.41)

По значению индукции определим, используя кривую намагничивания, напряженность

(4.42)

*Вся магнитная цепь*

(4.43)

## **4.5. Построение тяговых характеристик**

Ординаты выступающих на характеристике противодействующих усилий (рис. П.3, б) точек 1 – 3 проектируем на левый график (рис. П3, а) до пересечения с соответствующими силовыми характеристиками в точках . Наибольшая н.с. потребуется в критической точке . Эта величина является н.с. срабатывания (4.2). Через точку проводится прямая, параллельная оси ординат. Точки пересечения этой прямой с силовыми характеристиками проектируются на правый график до пересечения с абсциссами соответствующих зазоров в точках 5, 6 и 7. Через эти точки и точку 2 проводится плавная кривая, которая является тяговой характеристикой электромагнита при критическом усилии в точке 2 при критическом зазоре .

Для режима отпускания якоря из точки 4 проводится прямая, параллельная оси абсцисс, до пересечения с силовой характеристикой при в точке . Через эту точку проводится прямая, параллельная оси ординат. Эта прямая имеет абсциссу . Проводя прямые, параллельные оси абсцисс, на правом графике получают характеристики отпадания . Таким же способом можно построить тяговую характеристику при номинальной н.с. ном (4.3), (4.4) и других ее значениях.

В процессе указанных построений необходимо производить согласование характеристик тягового усилия и противодействующих усилий.

*Таблица 4.2 — Расчёт силовых характеристик электромагнита*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Точки на  силовой  характер. | Участок  магнитопровода |  |  |  |  |  |  |
|  | Рабочий зазор 1 | 2,723 | 3,1 | – | – | – | 432,53 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 2,7234,037  2,723 | 74 | 62,24 | 0,44  0,65  0,44 | 1,2  1,35  1,2 | 9,589 |
|  | Сердечник – скоба | 2,723 | 20 | – | – | – | 213,17 |
|  | Скоба – участок 0 | 2,723 | 37 | 74,69 | 0,36 | 1,05 | 3,928 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 2,7234,037  2,723 | 73 | 62,24 | 0,44  0,65  0,44 | 1,2  1,35  1,2 | 9,464 |
|  | Скоба - якорь | 2,723 | 0,1 | – | – | – | 53,915 |
|  | Якорь | 2,723 | 31 | 62,24 | 0,44 | 1,2 | 3,779 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 726,375 |
|  | Рабочий зазор 1 | 3,851 | 3,1 | – | – | – | 611,689 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 3,8515,709  3,851 | 74 | 62,24 | 0,62  0,92  0,92 | 1,3  2  1,3 | 13,031 |
|  | Сердечник – скоба | 3,851 | 20 | – | – | – | 301,468 |
|  | Скоба – участок 0 | 3,851 | 37 | 74,69 | 0,52 | 1,25 | 4,677 |

Продолжение таблицы 4.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 3,8515,709  3,851 | 73 | 62,24 | 0,62  0,92  0,62 | 1,3  2  1,3 | 12,861 |
|  | Скоба - якорь | 3,851 | 0,1 | – | – | – | 76,247 |
|  | Якорь | 3,851 | 31 | 62,24 | 0,62 | 1,3 | 4,094 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 1024,07 |
|  | Рабочий зазор 1 | 5,446 | 3,1 | – | – | – | 865,059 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 5,4468,074  5,446 | 74 | 62,24 | 0,44  0,65  0,44 | 1,8  4,1  1,8 | 24,586 |
|  | Сердечник – скоба | 5,446 | 20 | – | – | – | 426,341 |
|  | Скоба – участок 0 | 5,446 | 37 | 74,69 | 0,36 | 1,5 | 5,612 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 5,4468,074  5,446 | 73 | 62,24 | 0,44  0,65  0,44 | 1,8  4,1  1,8 | 24,266 |
|  | Скоба - якорь | 5,446 | 0,1 | – | – | – | 107,83 |
|  | Якорь | 5,446 | 31 | 62,24 | 0,44 | 1,8 | 5,669 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 1459,36 |
|  | Рабочий зазор 1 | 3,329 | 3,1 | – | – | – | 340,285 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 3,3294,578  3,33 | 74 | 62,24 | 0,53  0,74  0,53 | 1,31  1,5  1,31 | 10,603 |
|  | Сердечник – скоба | 3,33 | 20 | – | – | – | 260,63 |
|  | Скоба – участок 0 | 3,33 | 37 | 74,69 | 0,45 | 1,2 | 4,49 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 3,3304,578  3,329 | 73 | 62,24 | 0,53  0,74  0,53 | 1,31  1,5  1,31 | 10,459 |
|  | Скоба - якорь | 3,329 | 0,1 | – | – | – | 65,918 |
|  | Якорь | 3,329 | 31 | 62,24 | 0,53 | 1,31 | 4,126 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 696,51 |
|  | Рабочий зазор 1 | 4,708 | 3,1 | – | – | – | 481,235 |

Продолжение таблицы 4.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 4,7086,474  4,709 | 74 | 62,24 | 0,76  1,04  0,76 | 1,52  2,4  1,52 | 15,548 |
|  | Сердечник – скоба | 4,709 | 20 | – | – | – | 368,596 |
|  | Скоба – участок 0 | 4,709 | 37 | 74,69 | 0,63 | 1,4 | 5,238 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 4,7096,474  4,708 | 73 | 62,24 | 0,76  1,04  0,76 | 1,52  2,4  1,52 | 15,336 |
|  | Скоба - якорь | 4,708 | 0,1 | – | – | – | 93,222 |
|  | Якорь | 4,708 | 31 | 62,24 | 0,76 | 1,52 | 4,787 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 983,953 |
|  | Рабочий зазор 1 | 5,766 | 3,1 | – | – | – | 589,391 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 5,7667,929  5,767 | 74 | 62,24 | 0,93  1,27  0,93 | 1,9  4  1,9 | 24,355 |
|  | Сердечник – скоба | 5,767 | 20 | – | – | – | 451,424 |
|  | Скоба – участок 0 | 5,767 | 37 | 74,69 | 0,77 | 1,5 | 5,612 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 5,7677,929  5,766 | 73 | 62,24 | 0,93  1,27  0,93 | 1,9  4  1,9 | 24,024 |
|  | Скоба - якорь | 5,766 | 0,1 | – | – | – | 114,174 |
|  | Якорь | 5,766 | 31 | 62,24 | 0,93 | 1,9 | 5,984 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 1214,96 |
|  | Рабочий зазор 1 | 2,568 | 3,1 | – | – | – | 30,009 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 2,5682,733  2,568 | 74 | 62,24 | 0,41  0,44  0,41 | 1,2  1,25  1,2 | 9,112 |
|  | Сердечник – скоба | 2,568 | 20 | – | – | – | 201,03 |
|  | Скоба – участок 0 | 2,568 | 37 | 74,69 | 0,34 | 1,1 | 4,115 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 2,5682,733  2,568 | 73 | 62,24 | 0,41  0,44  0,41 | 1,2  1,25  1,2 | 8,979 |
|  | Скоба - якорь | 2,568 | 0,00439 | – | – | – | 50,843 |
|  | Якорь | 2,568 | 31 | 62,24 | 0,41 | 1,2 | 3,779 |

Продолжение таблицы 4.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 307,868 |
|  | Рабочий зазор 1 | 3,631 | 3,1 | – | – | – | 42,439 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 3,6313,865  3,632 | 74 | 62,24 | 0,58  0,62  0,58 | 1,3  1,4  1,3 | 10,097 |
|  | Сердечник – скоба | 3,632 | 20 | – | – | – | 284,299 |
|  | Скоба – участок 0 | 3,632 | 37 | 74,69 | 0,49 | 1,25 | 4,677 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 3,6323,865  3,631 | 73 | 62,24 | 0,58  0,62  0,58 | 1,3  1,4  1,3 | 9,949 |
|  | Скоба - якорь | 3,631 | 0,00439 | – | – | – | 71,903 |
|  | Якорь | 3,631 | 31 | 62,24 | 0,58 | 1,3 | 4,094 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 427,459 |
|  | Рабочий зазор 1 | 9,376 | 3,1 | – | – | – | 109,578 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 9,3769,979  9,378 | 74 | 62,24 | 1,51  1,6  1,51 | 10  20  10 | 123,136 |
|  | Сердечник – скоба | 9,378 | 20 | – | – | – | 734,057 |
|  | Скоба – участок 0 | 9,378 | 37 | 74,69 | 1,26 | 3,8 | 14,217 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 9,3789,979  9,376 | 73 | 62,24 | 1,51  1,6  1,51 | 10  20  109 | 241,449 |
|  | Скоба - якорь | 9,376 | 0,00439 | – | – | – | 185,653 |
|  | Якорь | 9,376 | 31 | 62,24 | 1,51 | 10 | 31,494 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 1439,59 |
|  | Рабочий зазор 1 | 4,784 | 3,1 | – | – | – | 4,657 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 4,7844,812  4,786 | 74 | 62,24 | 0,77  0,77  0,77 | 1,6  1,6  1,6 | 11,823 |
|  | Сердечник – скоба | 4,786 | 20 | – | – | – | 374,596 |
|  | Скоба – участок 0 | 4,786 | 37 | 74,69 | 0,64 | 1,5 | 5,612 |

Продолжение таблицы 4.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 4,7864,812  4,784 | 73 | 62,24 | 0,77  0,77  0,77 | 1,6  1,6  1,6 | 11,648 |
|  | Скоба - якорь | 4,784 | 0,00034 | – | – | – | 94,726 |
|  | Якорь | 4,784 | 31 | 62,24 | 0,77 | 1,6 | 5,039 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 508,1 |
|  | Рабочий зазор 1 | 6,765 | 3,1 | – | – | – | 6,586 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 6,7656,805  6,768 | 74 | 62,24 | 1,09  1,09  1,09 | 2,7  2,7  2,7 | 19,951 |
|  | Сердечник – скоба | 6,768 | 20 | – | – | – | 529,759 |
|  | Скоба – участок 0 | 6,768 | 37 | 74,69 | 0,91 | 1,95 | 7,296 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 6,7686,805  6,765 | 73 | 62,24 | 1,09  1,09  1,09 | 2,7  2,7  2,7 | 19,656 |
|  | Скоба - якорь | 6,765 | 0,00034 | – | – | – | 133,962 |
|  | Якорь | 6,765 | 31 | 62,24 | 1,09 | 2,7 | 8,503 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 725,713 |
|  | Рабочий зазор 1 | 9,366 | 3,1 | – | – | – | 9,117 |
|  | Сердечник:  сечение 1  сечение 2  сечение 3 | 9,3669,421  9,37 | 74 | 62,24 | 1,5  1,51  1,51 | 10  12  12 | 86,206 |
|  | Сердечник – скоба | 9,37 | 20 | – | – | – | 733,418 |
|  | Скоба – участок 0 | 9,37 | 37 | 74,69 | 1,25 | 3,8 | 14,217 |
|  | Скоба:  сечение 3  сечение 2  сечение 1 | 9,3709,421  9,366 | 73 | 62,24 | 1,51  1,51  1,5 | 12  12  10 | 84,932 |
|  | Скоба - якорь | 9,366 | 0,00034 | – | – | – | 185,463 |
|  | Якорь | 9,366 | 31 | 62,24 | 1,5 | 10 | 31,494 |
|  | Вся магнитная цепь |  |  |  |  |  | 1144,85 |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.А. Нейман, Е.Г. Порсев Электрические и электронные аппараты. Методическое руководство к курсовому проектированию – изд-во НГТУ – Новосибирск, 2007 – 76с.;
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1988. – 720с.;
3. Подключение промежуточного реле: [Электронный ресурс] Автоматизация и электрика. Режим доступа: http://www.asutpp.ru/elektrooborudovanie/promezhutochnoe-rele.html - Заглавие с экрана;
4. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1971. – 554с.;
5. Параметры коммутационных контактов электрических аппаратов: [Электронный ресурс] Школа для электрика. Режим доступа: http://electricalschool.info/naladka/420-parametry-kommutacionnykh-kontaktov.html - Заглавие с экрана;
6. О реле промежуточном: [Электронный ресурс] Энергомера. Режим доступа: http://www.elec.ru/articles/o-rele-promezhutochnom - Заглавие с экрана;
7. Нейман Л.А. Лекции по курсу «Электрические и электронные аппараты (ч. 2)»;
8. Искрогасящие цепи: [Электронный ресурс] АТОФ: надежность и качество. Режим доступа: http://www.atof.ru/pea/relay/rl\_050.shtml - Заглавие с экрана.