

Введение [1] [3]

Электромагнитные и электромеханические элементы наиболее старые элементы автоматики, но совершенствуясь и изменяясь, они подтверждают свою конкурентоспособность с современными элементами.

Электромагнит – простейший преобразователь сигнала в механическое движение. На обмотку электромагнита подается электрический сигнал, электромагнит притягивает подвижную часть, называемую якорем.

В зависимости от тока в обмотке бывают электромагниты переменного и постоянного тока. Электромагниты постоянного тока, в свою очередь, делятся на нейтральные и поляризованные. Работа нейтральных не зависит от полярности тока в его обмотке. В свою очередь в поляризованных же электромагнитах усилие, действующее на якорь, изменяет направление при изменении полярности тока.

Самыми распространенными являются электромагниты, снабженные контактной системой – электромагнитные реле.

Реле используется для управления небольшими силовыми нагрузками, устанавливаются, как правило, в низковольтных устройствах управления объектами промышленности. Реле так же можно разделить по величине потребляемой при срабатывании мощности на слаботочные нормальной чувствительности (до 1-5 Вт) и высокочувствительные (до 10 мВт).

Не всегда удается удовлетворить в одной конструкции всем требованиям, предъявляемым к электромагнитным реле. Основными являются требования коммутируемой мощности и чувствительности. Реле должны иметь малые габаритные размеры, большое число контактов, достаточный срок службы и достаточную надежность работы при вибрации, или резком колебании температуры и влажности.

Электромагнитное реле отзывается на изменение каких-либо параметров замыканием или размыканием контактов. Контакты реле

включаются в цепь, которая осуществляет контроль или управление аппаратами, включенными в силовую цепь.

Реле делятся на первичные, вторичные и промежуточные. Первичные включаются в цепь управления, вторичные подключаются через измерительные трансформаторы, промежуточные реле работают от исполнительных органов других реле и предназначаются для усиления и размножения сигнала. В настоящее время существует довольно широкий ассортимент промежуточных реле. Есть возможность подобрать промежуточное реле как по ценовой категории, так и по свойству решаемых задач. Самые распространённые производства фирм Finder, Phoenix, ABB, Schneider electric. Из отечественных укажем реле типа РПЛ, РПУ-2М, РП, РЭП.

В общем виде промежуточное реле является электромагнитной катушкой с сердечником, подключаемой на постоянный или на переменный ток, при подаче напряжения на которую возникает электромагнитная сила, притягивающая якорь, который, в свою очередь, замыкает подвижные контакты с неподвижными. Эти контакты, в свою очередь, работают в цепях управления. Одно промежуточное реле может иметь несколько групп замыкающих контактов и несколько групп размыкающих контактов. Необходимость в определенных технических характеристиках данного реле возникает из задач, стоящих перед проектировщиком.

Выбор промежуточного реле происходит на основании его технических характеристик. Таких как питающее напряжения (В), потребляемая мощность (Вт), коммутируемый ток (А), длительно допустимый ток контактов (А), число и вид контактов контактов и габаритные размеры.

Невзирая на выход реле полупроводниковых (твердотельных), создатели электромагнитных реле считают, что последние нельзя списывать со счетов по ряду причин.

- Сравнительно с полупроводниковыми аналогами электромагнитные реле стоят меньше.

- При немалых нагрузках коммутации - сравнительно меньшие размеры.
- Высокоустойчивы в условиях влияния наружных полей (электрических и магнитных).
- Стабильная управляющей цепи мощность, не подчиненная коммутируемой нагрузке.
- Благодаря невысокому контактному сопротивлению нет нужды во вспомогательных охлаждающих устройствах.
- Электромагнитные реле неустойчивы при КЗ и перегрузках.
- Использование в широком диапазоне. Электромагнитные реле позволяют применять для коммутирования как мощных питающих электроцепей, так и сигнальных маломощных схем.
- Выпускается значительное количество контактных комбинаций (мостовые, 2-полюсные и 1-полюсные).

В качестве прототипа было выбрано реле Finder 55.13. Данное реле имеет ряд преимуществ:

- высокая коммутационная способность реле (до 2А при постоянном напряжении 220В);
- высокая прочность изоляции между катушкой и контактами;
- высокий класс защиты изделий (IP50, IP67);
- высокое быстродействие (5/3 миллисекунд.);
- работа в больших температурных диапазонах -40 ...+85;
- низкое энергопотребление;
- использование реле одного типа для монтажа на DIN-рейку, на монтажную плату и на печатную плату;
- высокая механическая и электрическая износостойкость.

Реле 55 серии в основном применяется как промежуточное реле, связывая слаботочные выходы контроллера и силовую цепь.

1. Расчет токоведущего контура и его частей [1] [3]

Расчет токоведущего контура заключается в определении размеров сечения его частей. Сечение это исходная величина для последующих расчетов частей аппарата.

Расчет производим в режиме S1 – продолжительный режим.

Принимаем материал шины – медь твердотянутая марки М1, твердая ГОСТ – 859-66.

Предельная температура токоведущего контура сделанного из меди в аппаратах управления $T_d = 105^\circ C$ в продолжительном режиме. Принимаем запас $\Delta T = 5^\circ C$.

$$T = T_d - \Delta T = 105 - 5 = 100^\circ C, \quad (1)$$

Таким образом превышение температуры:

$$\tau = T - T_{окр} = 100 - 40 = 60^\circ C. \quad (2)$$

Исходная величина номинального тока для расчета размеров токоведущего контура $I_H = 10 \text{ A}$.

Так как отсутствуют дополнительные требования по току короткого замыкания принимаем:

$$I_{кз} = I_H \cdot 10 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ A}. \quad (3)$$

1.1. Расчет сечения шины по термической устойчивости

Термическая устойчивость аппарата – это его свойство выдерживать кратковременные тепловые действия тока короткого замыкания. Это свойство характеризуется номинальным током термической устойчивости, т.е. величиной тока, тепловое действие которого аппарат выдерживает в течение определенного времени так, что это не нарушает его нормальную работу. Токи короткого замыкания по времени воздействия меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей. Поэтому в процессе нагрева тепло не рассеивается в окружающую среду, то есть процесс адиабатический.

Расчет производим на время короткого замыкания $t_{кз} = 10$ с.

Допускаемая температура нагрева для токоведущих неизолированных выполненных из меди частей в режиме короткого замыкания, $T_K = 300$ °С.

Находим площадь сечения шины:

$$S_T = I_{кз} \sqrt{\frac{t_{кз}}{A_K - A_H}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{(3,75 - 1,5) \cdot 10^4}} = 2,108 \text{ мм}^2, \quad (4)$$

где A_K и A_H определяем из кривых нагрева проводников для кратковременного протекании тока:

$$A_K = 3,75 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}, \quad (5)$$

при $T_K = 300$ °С,

$$A_H = 1,5 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}, \quad (6)$$

при $T = 100$ °С.

С учетом того, что $S = a \cdot b$ и $n = \frac{a}{b} = 6$, получим:

$$a_T = \sqrt{n \cdot S_T} = \sqrt{6 \cdot 2,108} = 3,556 \text{ мм}, \quad (7)$$

$$b_T = \sqrt{\frac{S_T}{n}} = \sqrt{\frac{2,108}{6}} = 0,593 \text{ мм}. \quad (8)$$

Полученное значение b_T округляем до ближайшего стандартного значения.

Принимаем $b_T = 0,6$ мм.

Уточняем значение:

$$a_T = \frac{S_T}{b_T} = \frac{2,108}{0,6} = 3,513 \text{ мм} \approx 4 \text{ мм}. \quad (9)$$

С учетом полученных значений уточняем значение площади сечения шины:

$$S_T = a_T \cdot b_T = 4 \cdot 0,6 = 2,4 \text{ мм}^2.$$

1.2. Расчет сечения проводника по номинальному току

Определение сечения в режиме номинального тока производится с учетом того, чтобы установившаяся температура нагрева элементов токоведущего контура не превышала температуру, допустимую для изоляции.

Тепловые процессы в электрических аппаратах протекают в пределах ограниченных температур, поэтому сложные процессы одновременного действия трех видов теплообмена (конвекция, излучение и теплопроводность) можно рассматривать как отдельные действия каждого вида, а затем складывать параметры, полученные в результате отдельных расчетов. При этом учитываем действие двух типов (конвекция и излучение) вследствие незначительного влияния теплопроводности.

Определяем значение средней температуры:

$$T_{cp} = T_{окр} + \frac{T}{2} = 40 + \frac{60}{2} = 70^{\circ}C. \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекции:

$$K_{ТОК} = \left(1,39 - \frac{T_{cp}}{700}\right) \left(\frac{\tau}{a_T}\right)^{0,25} = \left(1,39 - \frac{70}{700}\right) \cdot \left(\frac{60}{4 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,25} = 15,341 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи излучения:

$$K_{ТОи} = 0,227 \cdot \zeta \cdot \left(\frac{T_{cp} + 273}{100}\right)^3 = 0,227 \cdot 0,65 \left(\frac{70 + 273}{100}\right)^3 = 5,954 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}, \quad (12)$$

где ζ – степень черноты, для меди $\zeta = 0,65$.

Находим суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$K'_{ТО} = K_{ТОК} + K_{ТОи} = 15,341 + 5,954 = 21,295 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}. \quad (13)$$

Т.к. шина окружена другими частями аппарата, коэффициент теплоотдачи уменьшается на 20-50 %. Принимаем коэффициент ухудшения $K_y = 1,3$.

$$K_{TO} = \frac{K'_{TO}}{K_y} = \frac{21,295}{1,3} = 16,381 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}. \quad (14)$$

Находим удельное сопротивление меди при температуре T:

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha (T - 20)) = 0,0184 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,0043(100 - 20)) = 2,47 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (15)$$

где ρ_{20} - удельное сопротивление медного проводника при 20 °C,

$$\rho_{20} = 0,0184 \text{ мкОм} \cdot \text{м},$$

α - температурный коэффициент сопротивления, в расчетах для меди принимают $\alpha = 0,0043 \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Находим значение геометрического показателя:

$$\Gamma = \frac{I_H^2 \cdot \rho \cdot 10^9}{K_{TO} \cdot \tau} = \frac{10^2 \cdot 2,47 \cdot 10^{-8} \cdot 10^9}{16,381 \cdot 60} = 2,513 \text{ мм}^2 \quad (16)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{\Gamma}{2 \cdot n(n+1)}} = \sqrt[3]{\frac{2,513}{2 \cdot 6 \cdot (6+1)}} = 0,144 \text{ мм}. \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{\Gamma}{2b} + \frac{b^2}{4}} - \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{2,513}{2 \cdot 0,144} + \frac{0,144^2}{4}} - \frac{0,144}{2} = 2,883 \text{ мм}. \quad (18)$$

Округляем а по стандартному ряду значений а=3 мм.

Находим фактическую площадь шины:

$$S_H = ab = 3 \cdot 0,144 = 0,432 \text{ мм}^2. \quad (19)$$

Выбираем окончательные размеры шины. Полученные данные, где а=4 мм, b=0,6 мм, удовлетворяют условиям термической устойчивости.

2. Расчет коммутирующих контактов [1]

Контакты в аппаратах должны обеспечить длительную работу без перегрева в нормальном режиме, а также электродинамическую и термическую стойкость при коротком замыкании. Подвижные контакты не должны разрушаться под действием электрической дуги, которая образуется при размыкании, и замыкаться без приваривания и плавления при включении на короткое замыкание. При расчете требуется определить силу контактного нажатия, при которой температура нагрева места контактирования не превысит допустимую. В режиме длительного протекания тока контакты рассчитываются из условия, чтобы выделяемая в них тепловая мощность в совокупности с условиями теплоотдачи создавала бы такой нагрев, при котором температура контактной точки не превышала бы допустимую, которая в пределе не должна быть больше температуры рекристаллизации контактного материала. Так как в проектируемом реле протекает небольшой ток, по конструктивной форме выбираются контакты с плоскими консольными пружинами. По форме контактной поверхности целесообразно выбрать точечный контакт. От материала контакта в большой степени зависит его прочность и срок службы. К материалу контактов предъявляются следующие требования:

1. Высокая электро- и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии.
3. Стойкость против образования пленок.
4. Малая твердость материала.
5. Малая эрозия.
6. Высокая дугостойкость.
7. Высокое значение параметров, необходимых для дугообразования.
8. Простая обработка и дешевизна.

Для материала контактов был выбран металлокерамический сплав AgNi . Металлокерамика сочетает высокую стойкость с хорошей проводимостью.

Основные свойства материала:

Плотность: $\gamma = 9,6 \text{ г/см}^3$,

Удельное электрическое сопротивление: $\rho_{20} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,

Твердость по Бринеллю: $H_B = (55 \div 75) \cdot 10^8 \text{ Па}$,

Температурный коэффициент сопротивления: $\alpha = 0,0036 \text{ 1/град}$,

Модуль упругости: $E = 13 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

Размеры контактов зависят от номинального тока, частоты коммутации, типа контактной системы. Из-за номинального тока 10 А диаметр контакта принимается равным 5 миллиметров, высота контактов 1,6 мм.

Определяем радиус закругления контактов:

$$R_{\text{закр}} = \frac{(D/2)^2 + \Delta h^2}{2 \cdot \Delta h} = \frac{(5/2)^2 + 1,6^2}{2 \cdot 1,6} = 2,75 \text{ мм}. \quad (20)$$

В соответствии с ГОСТ 403-73 допустимая температура для контактов с металлокерамическими накладками на основе серебра допустимая температура $T_d = 80^\circ \text{C}$. Эта температура ограничивается предельно допустимыми температурами соседних частей.

Контакты нагреваются из-за возникновения дуги и при протекании тока через замкнутые контакты, а переходное сопротивление увеличивается из-за роста удельного сопротивления материала контактов. Находим удельное сопротивление:

$$\rho = \rho_{20} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha (T_{\text{дон}} - 20) \right) = 3 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0036 (80 - 20) \right) = 3,432 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (21)$$

Сила нажатия контактов должна удовлетворять требованиям не только в рабочем режиме, но и при кратковременных сверхтоках – пусковых, перегрузочных и короткого замыкания, чтобы не произошел отброс

контактов вследствие электродинамических сил и не происходило их сваривание по причине дугообразования при вибрации и отбросах.

Находим конечное контактное нажатие согласно:

$$F_K = f_K \cdot I_H = 15 \cdot 10 = 150 \frac{\text{гс}}{\text{А}} = 1,2 \text{ Н}, \quad (22)$$

где f_K – удельное нажатие, для контактов с накладками из металлокерамики.

Удельное нажатие составляет $f_K = (7 \div 15) \text{ гс/А}$.

Принимаем значение контактного нажатия $F_K = 1,2 \text{ Н}$.

По рекомендациям величину начального контактного нажатия возьмем равной 0,4-0,75 от величины конечного нажатия:

$$F_{KH} = 0,55 F_K = 0,55 \cdot 1,2 = 0,66 \text{ Н}. \quad (23)$$

На основании исследований аппаратов установлено, что при силе нажатия от (0,1-0,15)Н до сотен ньютонов возникает упругая деформация металла. Задаемся упругой деформацией контактов. При этой деформации материала радиус контактной площадки определяется по следующей зависимости:

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_K \cdot R_{закр}}{E \cdot n}} = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,2 \cdot 0,00275}{13 \cdot 10^{10} \cdot 6}} = 1,795 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (24)$$

Находим механическое напряжение конечного нажатия:

$$P = \frac{F_K}{\pi \cdot a^2} = \frac{1,2}{3,14 \cdot (1,795 \cdot 10^{-5})^2} = 1,186 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2. \quad (25)$$

Находим переходное сопротивление коммутирующих контактов.

1. Переходное сопротивление контактов определяемое по зависимостям, выведенным теоретическим путем. Зависимость переходного сопротивления стягивания (сужения) выглядит следующим образом:

$$R_{CT} = \frac{\rho}{2 \cdot a \cdot n} = \frac{3,432 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 1,795 \cdot 10^{-5} \cdot 6} = 1,593 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \quad (26)$$

2. Переходное сопротивление коммутируемых контактов, определяемое по формуле, найденной по опытными данным:

$$R_{\text{ПП}} = \frac{k_{\text{ПХ}}}{(0,1 \cdot F_K)^m} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{дон}} - 20) \right) =$$

$$= \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{(0,1 \cdot 1,2)^{0,5}} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0036(80 - 20) \right) = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad (27)$$

где $k_{\text{ПХ}}$ – коэффициент, учитывающий материал и состояние контактных поверхностей, для металлокерамики $k_{\text{ПХ}} = (0,2 \div 0,3) 10^{-3}$,

m – коэффициент формы контактной поверхности, для точечного контакта $m = 0,5$.

Находим напряжение на контакте.

Падение напряжения при замкнутых коммутирующих контактах в токоведущем контуре аппарата в основном складывается из переходного сопротивления этих контактов. Найдем падение напряжения:

$$U_K = I_K \cdot R_{\text{ПП}} = 10 \cdot 6,6 \cdot 10^{-4} = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \quad (28)$$

В существующих типах аппаратов управления до 1000 В при контактах в воздухе падение напряжение должно находиться в пределах до 2–20 мВ. Данное условие в расчете выполняется.

Тепловой расчет

Находим температуру для коммутирующего контакта:

$$T_{\text{КК}} = \Delta T_{\text{КХ}} + T_P + T_{\text{Ш}} + T_{\text{ОКР.СР}}. \quad (29)$$

Падение напряжения в контакте связано с превышением температуры площадки контактирования над температурой металла контакта зависимостью:

$$\Delta T_{\text{КХ}} = \frac{U_K^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho} = \frac{(6,6 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 325 \cdot 3,432 \cdot 10^{-8}} = 0,488^\circ \text{С}. \quad (30)$$

Превышение температуры не более $(5-10)^\circ \text{С}$, т.е. полученное значение температура не превышает допустимых значений.

$$T_P = \frac{P_K}{2\sqrt{\lambda \cdot S \cdot \Pi \cdot K_{TO}}} = \frac{0,066}{2\sqrt{325 \cdot 2,94 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0098 \cdot 22,26}} = 2,287^\circ\text{C}, \quad (31)$$

где P_K – тепловая мощность, полученная в контактах при протекании тока:

$$P_K = I_H^2 R_{\Pi P} = 10^2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-4} = 0,066 \text{ Вт}. \quad (32)$$

Т.о. температура коммутирующего контакта равна:

$$T_K = \Delta T_{KX} + T_P + \tau + T_{OKP.CP} = 0,488 + 2,287 + 6,4 + 40 = 49,175^\circ\text{C}. \quad (33)$$

Т.к. шина для аппарата была выбрана по термической стойкости ее температура значительно меньше допустимой. Поэтому температура коммутирующего контакта тоже значительно меньше допустимого значения.

При протекании через контакты токов, значительно больших номинальных происходит повышенное нагревание и как результат происходит сваривание. Но варивание контактов может и не быть причиной выхода из строя аппарата, если он способен разомкнуть сварившиеся контакты.

Есть два параметра, которые являются критерием оценки. Это начальный ток сваривания и сила, требуемая для отрыва сварившихся контактов.

Найдем ток сваривания контактов. Имеется несколько методов для определения величины тока сваривания.

Метод, приводящий к совпадению расчетного значения с экспериментом, для одноточечных серебряных маломощных контактов дает зависимость:

$$I_{CB} = \frac{2 \cdot U_{\Pi\Lambda} \cdot \sqrt{F_K}}{\rho \cdot \sqrt{\pi \cdot H_B}} = \frac{2 \cdot 0,37 \sqrt{1,2}}{3,432 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{3,14 \cdot 55 \cdot 10^8}} = 179,7 \text{ А}, \quad (34)$$

где $U_{\Pi\Lambda}$ – напряжение плавления металла контактов. Для контактов на основе серебра $U_{\Pi\Lambda} = 370 \text{ мВ}$.

Другим методом для нахождения тока сваривания является метод, в основе которого лежит соотношение, находящее связь между падением

напряжения в контактах и установившейся температурой контактной площадки, дающий следующую зависимость:

$$I_{CB} = A \cdot \sqrt{f_{к.пл}} \cdot \sqrt{F_K} = 113,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1,2} = 176,3 \text{ А}, \quad (35)$$

где $f_{к.пл}$ – коэффициент, характеризующий увеличение контактной площадки в процессе нагревания, зависит от силы нажатия и от продолжительности импульса находится в пределах 2 – 4. Принимаем $f_{к.пл} = 2$;

A – постоянная для каждого материала величина,

$$A = \sqrt{\frac{32 \cdot \lambda \cdot T_{пл} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot T_{пл}\right)}{\pi \cdot H_B \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T_{пл}\right)}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 390 \cdot 960 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,004 \cdot 960\right)}{3,14 \cdot 55 \cdot 10^8 \cdot 3,432 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,004 \cdot 960\right)}} = 113,8 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (36)$$

Ожидаемые по расчетам токи сваривания превышают ток короткого замыкания. Контакты «проходят» расчет на термическую стойкость.

Динамическая стойкость

Проверяем силу отброса контактов. Электродинамическая сила, вызывающая отталкивание контактов, возникает вследствие сужения линий тока в контакт - детали при подходе его к месту контактирования:

$$F = 10^{-7} (I_{кз})^2 \cdot \ln(D / d) = 10^{-7} \cdot 100^2 \cdot \ln\left(\frac{5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 0,0016 \text{ Н}. \quad (37)$$

Для исправной работы реле необходимо чтобы выполнялось условие, F не превышало (10-20)% от значения F_K ((10-20)% $F_K = (0,12-0,24)$ Н). Данное условие выполняется. Принятая сила нажатия больше силы электродинамического отталкивания в контактах, поэтому контакты не будут расходиться под действием электродинамических сил.

3. Расчет дугогасительной системы [1]

При размыкании электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов обычно на них возникает дуговой разряд, если величина тока и напряжения превосходят некоторые критические значения. Эти критические значения зависят от ряда факторов: материала контактов, параметров цепи, свойств среды и др.

Возникновение дуги на контактах аппарата ведет к их значительному износу и сокращению срока службы аппарата. Степень износа находится практически в прямой зависимости от размыкаемого тока и времени гашения дуги. Одним из наиболее применяемых средств уменьшения износа контактов под влиянием дуги является сокращение времени горения дуги.

При переменном токе дуга является проводящим элементом цепи в течение всей полуволны тока, процесс гашения дуги по существу проходит вблизи нулевой паузы тока, когда электромагнитная энергия цепи близка к нулю. В результате вероятность появления опасных перенапряжений мала.

Возникающая при размыкании контактов дуга под действием электромагнитных сил, вызванных взаимодействием электрического тока, протекаемого по токоведущему контуру аппарата приводит к растягиванию электрической дуги. Данное явление также способствует уменьшению времени гашения дуги.

Величина раствора контактов при гашении дуги переменного тока до 1000 В не имеет обычно такого решающего значения, как при постоянном токе. Однако при большом растворе и более длинной дуге без необходимости увеличивается выделяемая в ней энергия. Малые растворы контактов также применять нельзя, с целью предохранения от повторного включения контактов после отброса контактной системы от упора при отключении, а также возможность образования при отключении тока между контактами перемычки из расплавленного металла.

Как основной способ дугогашения при размыкании цепей переменного тока до (220 – 380) В, (50 – 500) Гц обычно применяется двукратный разрыв цепи. Главными факторами которого являются начальная восстанавливающаяся прочность ($U_{вп}^0$) околоскатной зоны и число разрывов цепи тока (n).

Переходный процесс восстановления напряжения может быть колебательным и апериодическим. При апериодическом процессе восстанавливающееся напряжение u_B не может быть больше амплитудного значения $U_{отк}$ напряжения отключаемого источника питания. При колебательном процессе u_B практически не превышает $2 U_{отк}$.

Для реле предельный отключаемый ток цепей переменного тока:

$$I_{прд.отк.} = 16 \cdot I_H = 16 \cdot 10 = 160 \text{ А.} \quad (38)$$

Определяем величину начальной восстанавливающейся прочности. Для контактов из металлокерамики при токе отключения $I_{отк.} = 160 \text{ А}$, начальная восстанавливающаяся прочность $U_{в.п.}^0 = 110 \text{ В}$.

По кривым берем предельно возможную собственную частоту. По величине отключаемого тока определяем собственную частоту отключаемой цепи, которая имеет значение $f_0 = 56 \text{ кГц}$.

Скорость роста прочности определяем по величине тока отключения $K_{п} = 1,15 \text{ В/мкс}$.

Определяем коэффициент амплитуды, для дугогасительных устройств со свободной дугой:

$$K_a = 1 + e^{-0,0003 \cdot f_0} = 1 + e^{-0,0003 \cdot 56000} \text{ А.} \quad (39)$$

Определяем удельную величину эквивалентного сопротивления дуги

$$R_{д}^0 = 0,015 + \frac{14200}{I_{отк}^0} = 0,015 + \frac{14200}{160^2} = 0,57 \text{ Ом/см.} \quad (40)$$

Индуктивность отключаемой цепи:

$$L = \frac{U_H}{I_{OT} \cdot \omega} \sqrt{1 - \cos^2 \phi} = \frac{250}{160 \cdot 314} \sqrt{1 - 0,8^2} = 2,98 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (41)$$

Определяем длину дуги на один разрыв:

$$l_{д}^0 = \sqrt{\delta_K^2 + \frac{40,5 \cdot I_{OTK}^2 \cdot t^2}{\delta_K}} = \sqrt{2^2 + \frac{40,5 \cdot 160^2 \cdot 0,008^2}{2}} = 6 \text{ мм}, \quad (42)$$

где t – время гашения дуги, принимают меньше одного полупериода тока $t=0,008$ с, чтобы происходило гарантированное гашение дуги при первом переходе тока через нулевое значение.

Рассчитываем число разрывов при апериодическом процессе:

$$n \geq \frac{K_H U_H - \left(\frac{\beta_K \cdot K_{II} \cdot L}{M_0} \right) \left(1 + \ln \frac{K_H U_H M_0}{\beta_K K_{II} \cdot L} \right)}{U_{ВП}^0 + 0,34 \cdot K_H \cdot l_{д}^0 \cdot R_{д}^0 \cdot I_{OTK}} =$$

$$= \frac{0,61 \cdot 250 - \left(\frac{6 \cdot 1,15 \cdot 2,98 \cdot 10^{-3}}{190 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot \left(1 + \ln \frac{0,61 \cdot 250 \cdot 190 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 1,15 \cdot 2,98 \cdot 10^{-3}} \right)}{110 + 0,34 \cdot 0,61 \cdot 0,6 \cdot 0,42 \cdot 160} = 0,7 \text{ мм}, \quad (43)$$

где

$$k_H = 0,9 \cdot k_{CX} \sqrt{1 - \cos \phi} = 0,9 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{1 - \cos} = 0,9 \cdot 1,5 \sqrt{1 - 0,8} = 0,61, \quad (44)$$

где k_{CX} – коэффициент схемы определяется схемой отключаемой цепи и отключающего аппарата.

M_0 – функция отключаемого тока. При $I_{OTK} = 160$ А,
 $M_0 = 79 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{мкс} \cdot B$.

β_K – коэффициент, учитывающий влияние контактного материала на скорость восстановления прочности. Для контактов (AgNi) при частоте источника питания 50 Гц, $\beta_K = 6$.

Полученное значение количества контактов является много меньше чем используется, т.е. дуга при $n=2$ будет гаситься.

Проверяем условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в апериодический:

$$f_0 = 56000 \geq M_0 \cdot n_a \cdot 10^6 / (\pi \cdot L) = 79 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6 / 3,14 \cdot 2,98 \cdot 10^{-3} = 16890 \text{ Гц}, \quad (45)$$

Условие соблюдается. Значит, в нашем случае наблюдается апериодический процесс восстановления напряжения и двух разрывов на полюс аппарата является достаточным для гашения дуги в воздухе.

4. Разработка пружинного механизма [1] [3]

Разработка пружинного механизма заключается в выборе геометрических размеров контактных пружин.

Наклон механической характеристики зависит от модуля упругости экваториального момента инерции J , который определяется толщиной и шириной пружины b и h . Конечный зазор для «отлипания» якоря для средних реле выполняется из пластин диамагнитного материала и принимается толщиной $(0,1 \div 0,4)$ мм, у миниатюрных реле весом в несколько грамм конечный зазор определяется только толщиной гальванических покрытий и равен $(0,05 \div 0,08)$ мм.

4.1. Выбор материала контактных пружин

Контакты в пружинном механизме должны не только создавать достаточное контактное нажатие, но и иметь маленькое электрическое сопротивление, так как они являются проводниками тока.

В электромагнитных реле автоматики широкое применение нашли контактные пружины, изготовленные из сплавов цветных металлов, которые имеют небольшую величину модуля упругости и поэтому позволяют получить большие прогибы по сравнению со стальными пружинами при небольших контактных давлениях. При одной и той же нагрузке пружины из цветных металлов имеют примерно в два раза больший прогиб, чем стальные пружины одинаковых размеров. Однако стальные пружины имеют значительно большую величину допустимого напряжения σ и большее сопротивление σ/E , чем бронзовые, поэтому максимально допустимый прогиб у них больше.

Достоинство пружин из сплавов цветных металлов является меньшее удельное электрическое сопротивление, лучшая технологичность и стойкость к коррозии.

Предварительно выбираем материал и размеры контактных пружин

Материал пружин – бериллиевая бронза.

Ширина пружин: $b=4$ мм.

Толщина пружин: $h=0,4$ мм.

Длина пружины от места закрепления до контактов $l_k = 25$ мм.

Длина пружины от места закрепления до электромагнита $l_{\text{я}} = 12$ мм.

4.2. Расчет контактов механической характеристики

Расчет экваториального момента инерции сечения пружины:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{4 \cdot 0,4^3}{12} = 0,021 \text{ (мм)}^4 \text{ Гц}, \quad (46)$$

Критерий жесткости:

$$\Gamma = 3 \cdot J \cdot E = 3 \cdot 0,021 \cdot 117000 = 7488 \text{ Гц}, \quad (47)$$

где $E=117000$ Н/мм² - модуль упругости

Коэффициенты собственной и взаимной гибкости контакта:

$$C_K = \frac{l_k}{\Gamma} = \frac{25^3}{7488} = 2,086 \left(\frac{\text{мм}}{\text{Н}} \right). \quad (48)$$

Так как геометрические размеры электромагнита пока неизвестны, необходимо определить усилия и перемещения на якоре, выразив через отношение якоря к плечу $r_{\text{я}}/r_{\text{б}}$.

Для этапов размыкания и замыкания контактных пар деформация пружины равна:

$$U_{\kappa 1} = U_{\kappa 2} = P_{\kappa} \cdot C_K = 0,243 \cdot 2,086 = 0,507 \text{ мм}. \quad (49)$$

где P_{κ} - усилие на контактах, приведенное к плечу якоря

$$P_{\kappa} = 0,1 \cdot \frac{25}{12} = 0,208 \text{ Н.} \quad (51)$$

Для свободного хода:

$Y_{\kappa 0} = 1 \text{ мм}$ - из прототипа.

$$P_{\kappa 2} = 0$$

Суммарный ход буксы:

$$Y_{\kappa \Sigma} = Y_{\kappa 1} + Y_{\kappa 2} + Y_{\kappa 0} = 0,507 + 0,507 + 1 = 2,014 \text{ мм.} \quad (52)$$

Принимаем $Y_{\kappa \Sigma} = 2 \text{ (мм)}$

Привести ход буксы к ходу якоря можно по формуле:

$$\Delta \delta_i = Y_{\kappa i} = \frac{r_{\text{я}}}{r_{\kappa}} = 2 \cdot \frac{12}{25} = 0,96 \text{ мм} \quad (53)$$

Принимаем $\Delta \delta = 1 \text{ мм}$.

По результатам расчета строим механическую характеристику.

4.3. Расчет возвратной пружины

Для расчета размеров и числа витков пружины должны быть заданы рабочее и предварительное усилие F_p и F_{np} , рабочая деформация пружины Δl_p .

F_p и F_{np} для пружин контактов выбираются по величине конечного и начального F_{κ} и $F_{\text{н}}$ контактного нажатия. Для рычажных и линейных контактов $F_p = F_{\kappa}$ и $F_{np} = F_{\text{н}}$.

$F_p = F_{\kappa} = 1,019 \cdot \frac{12}{2} = 6,114 \text{ Н.}$ - усилие, приведенное к плечу возвратной пружины.

$F_{np} = F_{\text{н}} = 0,784 \cdot \frac{12}{2} = 4,704 \text{ Н.}$ - усилие, приведенное к плечу возвратной пружины.

Рабочая деформация пружины должна быть пересчитана с учетом плеча якоря и пружины:

$$\Delta l = \Delta \delta \cdot \frac{l_a}{l_b} = 1 \cdot \frac{12}{2} = 6 \text{ мм.} \quad (54)$$

Необходимая жесткость пружины:

$$J = \frac{F_k - F_{np}}{\Delta l_p} = \frac{6,114 - 4,704}{6} = 0,235 \text{ Н/мм.} \quad (55)$$

Максимальное усилие:

$$F_m = \frac{F_p}{1 - \delta} = \frac{6,114}{1 - 0,05} = 6,435 \text{ Н.} \quad (56)$$

δ – относительный инерциальный зазор.

Им можно задаться $\delta = 0,05 \div 0,1$ для пружины растяжения.

Максимальная деформация пружины:

$$f_m = \frac{F_m}{J} = \frac{6,435}{0,235} = 27,382 \text{ мм.} \quad (57)$$

Выбираем материал возвратной пружины. Сталь углеродистая

$G = 80000 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$

$\sigma_{AKP} = 580 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$

Допустимый средний диаметр пружины по условию продольной устойчивости:

$$D_{cp} \geq \frac{f_m}{2 \div 4} = \frac{27,382}{2 \div 4} = 13,691 \div 6,845 \text{ (мм)} \quad (58)$$

Принимаем $D_{cp} = 13 \text{ (мм)}$.

Диаметр проволоки:

$$d = 2 \sqrt[3]{\frac{F_m D_{cp}}{\pi \sigma_{qkp}}} = 2 \sqrt[3]{\frac{6,435 \cdot 13}{3,14 \cdot 580}} = 0,616 \text{ (мм)} \quad (59)$$

Полученное значение диаметра d нужно округлить до ближайшего из стандартного ряда $d=0,6$ (мм).

Индекс пружины, характеризующей концентрацию напряжения в материале пружины:

$$C = \frac{D_{cp}}{d} = \frac{13}{0,6} = 21,7 \quad (60)$$

Число витков пружины округляется до целого с уточнением J .

$$n = \frac{G \cdot d}{8C^2 J} + 1,5 = \frac{200000 \cdot 0,7}{8 \cdot 21,7^2 \cdot 0,235} + 1,5 = 54,252 \quad (61)$$

1,5 витка добавляется на крайние поджатые витки в пружинах сжатия.

Уточняется напряжения кручения:

$$\sigma_{\kappa} = \frac{8 \cdot F_m \cdot C}{\pi d^2} = \frac{8 \cdot 6,435 \cdot 21,7}{3,14 \cdot 0,6^2} = 1002 \text{ Н/мм}. \quad (62)$$

Уточняем жесткость пружины:

$$J = \frac{G \cdot d}{8C^3 n} = \frac{80000 \cdot 0,6}{8 \cdot 21,7^3 \cdot 55} = 0,247 \text{ Н/мм}. \quad (63)$$

Минимальная длина пружины:

$$l_{\min} = d(n + 1,5) = 0,6 \cdot (54,252 + 1,5) = 33,1 \text{ мм}. \quad (64)$$

Свободная длина пружины:

$$l_{eo} = l_{\min} + \frac{F_m}{J} = 33,1 + \frac{6,435}{0,247} = 59,152 \text{ мм}. \quad (65)$$

Шаг навивки:

$$t = \frac{l_{eo} - l_{\min}}{n} + d = \frac{59,152 - 33,1}{55} + 0,3 = 0,774. \quad (66)$$

5. Расчет механической характеристики [1] [3]

Материал – пружинно-контактный сплав CrMnH-99

Модуль упругости $E = 78000 \frac{H}{мм^2}$

Удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,032 \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$

Предел выносливости при изгибе $\sigma = 150 \frac{H}{мм^2}$

Контактное нажатие в пересчете на два контакта: $F_k = 1,2 H$

Размер пружины

Толщина $b = 4 \text{ мм}$.

Высота подвижной $h_n = 0,3 \text{ мм}$.

Высота неподвижной $h_n = 0,3 \text{ мм}$.

Начальный зазор $\delta_H = 2 \text{ мм}$.

Конечный зазор $\delta_K = 0,1 \text{ мм}$.

$l_o = 12 \text{ мм}$. $l_k = 25 \text{ мм}$. $l_y = 15 \text{ мм}$.

Подвижные пружины.

Экваториальный момент:

$$J_n = \frac{b \cdot (h_n)^3}{12} = 9 \cdot 10^{-3}. \quad (67)$$

Коэффициент собственной и взаимной гибкости:

$$c_o = \frac{l_o^3}{3 \cdot E \cdot J_n} = \frac{12^3}{3 \cdot 78000 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 0,821, \quad (68)$$

$$c_k = \frac{l_k^3}{3 \cdot E \cdot J_n} = \frac{25^3}{3 \cdot 78000 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 7,418, \quad (69)$$

$$c_{ко} = \frac{(3l_k - l_o) \cdot l_o^2}{6 \cdot E \cdot J_n} = \frac{(3 \cdot 25 - 12) \cdot 12^2}{6 \cdot 78000 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 2,154. \quad (70)$$

Неподвижные пружины.

$$c_y = \frac{l_y^3}{3 \cdot E \cdot J_n} = \frac{15^3}{3 \cdot 78000 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 1,603, \quad (71)$$

$$c_{\kappa y} = \frac{(3l_{\kappa} - l_y) \cdot l_y^2}{6 \cdot E \cdot J_n} = \frac{(3 \cdot 25 - 15) \cdot 15^2}{6 \cdot 78000 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 3,205, \quad (72)$$

$$F_{\kappa y} = 0,6 \cdot F_{\kappa\kappa} = 0,6 \cdot 1,2 = 0,72 \text{ Н}, \quad (73)$$

$$F_{нач} = 0,7 \cdot F_{\delta 1} = 0,189 \text{ Н}. \quad (74)$$

Первый этап – совместный прогиб:

$$\Delta F_{\kappa} = F_{\kappa} - F_{\kappa y} = 1,2 - 0,72 = 0,48 \text{ Н}, \quad (75)$$

$$F_{\delta 1} = \Delta F_{\kappa} \cdot \frac{c_{\kappa} + c_{\kappa}}{c_{\kappa\delta}} = 0,48 \cdot \frac{7,418 + 7,418}{2,154} = 3,306 \text{ Н}, \quad (76)$$

$$f_{\delta 1} = c_{\delta} \cdot F_{\delta 1} - c_{\kappa\delta} \cdot \Delta F_{\kappa} = 0,821 \cdot 3,306 - 2,154 \cdot 0,48 = 1,681 \text{ мм}. \quad (77)$$

Второй этап – свободный прогиб:

$$Y_p = 2 - f_{\delta 1} = 0,319 \text{ мм}, \quad (78)$$

$$f_{\delta 2} = Y_p \cdot \frac{c_{\delta}}{c_{\kappa\delta}} = 0,319 \cdot \frac{0,821}{2,154} = 0,121 \text{ мм}, \quad (79)$$

$$F_{\delta 2} = \frac{f_{\delta 2}}{c_{\kappa\delta}} = \frac{0,121}{2,154} = 0,056 \text{ Н}. \quad (80)$$

Третий этап – совместный прогиб подвижной и неподвижной пружины:

$$F_{\delta 3} = \Delta F_{\kappa} \cdot \frac{2 \cdot c_{\kappa}}{c_{\kappa\delta}} = 0,48 \cdot \frac{2 \cdot 7,418}{2,154} = 3,306 \text{ Н}, \quad (81)$$

$$f_{\delta 1} = c_{\delta} \cdot F_{\delta 3} - c_{\kappa\delta} \cdot \Delta F_{\kappa} = 0,821 \cdot 3,306 - 2,154 \cdot 0,48 = 1,681 \text{ мм}. \quad (82)$$

Суммарный ход буксы:

$$f_{\Sigma} = f_{\delta 1} + f_{\delta 2} + f_{\delta 3} = 3,483 \text{ мм}, \quad (83)$$

$$\Delta \delta = \delta_H - \delta_K = 1,9 \text{ мм}. \quad (84)$$

Перемещение якоря на этапе:

$$\Delta\delta_i = f_{\delta 1} \cdot \frac{\Delta\delta}{f_{\Sigma}} = 1,681 \cdot \frac{1,9}{3,483} = 0,917 \text{ мм.} \quad (85)$$

Приращение усилия на якоре на этапе где N=2, число переключающих контактов:

$$\Delta F_i = F_{\delta 1} \cdot \frac{\Delta\delta}{f_{\Sigma}} \cdot N = 3,306 \cdot \frac{1,9}{3,483} \cdot 2 = 3,606 \text{ Н.} \quad (86)$$

Усилие на якоре после i-го этапа:

$$F_{np} = \Sigma \cdot \Delta F_i \quad (87)$$

Величина воздушного зазора после i-го этапа:

$$\delta_i = \delta_H - \Sigma \cdot \Delta\delta_i \quad (88)$$

Результат расчет представлен в таблице 1.

Этапы	f	F	$\Delta\delta$	δ	ΔF	F_{np}
нач	0	0,189	0	2		0,189
1	1,681	3,306	0,917	1,083	3,606	3,795
2	0,121	0,056	0,066	1,017	0,061	3,856
3	1,681	3,306	0,917	0,09	3,606	7,462

Таблица 1. Расчет противодействующей силы.

По данной таблице строим механическую характеристику (рисунок 1)



Рисунок 1. Механическая характеристика.

Определяем критическую точку:

$$1) F_1 \cdot \delta^2 = 7,462 \cdot 0,09^2 = 0,06 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2, \quad (89)$$

$$2) F_2 \cdot \delta^2 = 3,856 \cdot 1,017^2 = 3,988 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2, \quad (90)$$

$$3) F_{\text{вн}} \cdot \delta^2 = 0,189 \cdot 2^2 = 0,756 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2. \quad (91)$$

Точка 2 является критической, производим приведение критической точки на начальный зазор:

$$F_{\text{кр}} = F_2 \cdot \frac{\delta_{\text{нп}}}{\delta_{\text{н}}} = 3,856 \cdot \frac{1,017}{2} = 1,96 \text{ Н}. \quad (92)$$

6. Расчет основных размеров сердечника и катушки электромагнита переменного тока [2] [4] [5]

Индукцию в воздушном зазоре при отпущенном якоре необходимо выбирать таким образом, чтобы максимальная индукция в сердечнике при притянutom якоре была бы у колена перегиба кривой намагничивания. Опыт эксплуатации электромагнитных реле показал, что оптимальная конструкция таких реле наблюдается при ненасыщенной магнитной цепи и индукция находится в пределах 1-2 Т. Увеличение индукции в воздушном зазоре приводит к увеличению расхода меди обмотки. Для электромагнитных реле индукцию в воздушном зазоре можно выбрать в пределах $B_{\delta om} = (0,2 - 0,6)T$. Индукцию в рабочем зазоре при отпущенном якоре можно определить, используя конструктивный фактор Γ .

Индукцию в рабочем зазоре при отпущенном якоре можно определить, используя коэффициент рассеяния:

$$B_{com} = \delta_p \cdot B_{\delta om} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_c}. \quad (93)$$

Опыт изготовления электрических аппаратов показал, что электромагнитные механизмы с ненасыщенной магнитной цепью являются оптимальными по большинству критериев оптимальности. Для магнитных цепей при расчете площади сечения торца можно использовать формулу Максвелла. Она дает большую точность при притянutom якоре, при отпущенном же якоре не учитывает силу от потоков выпучивания, но при определении размеров конструкции эта погрешность является вполне допустимой:

$$F_{эсрб} = \frac{B_{\delta om}^2}{2\mu_0} S_T, \quad (94)$$

где $F_{эсрб}$ - необходимое тяговое усилие при срабатывании;

$B_{\delta om}^2$ - индукция в воздушном зазоре при отпущенном якоре;

S_T - площадь торцевой поверхности сердечника.

Площадь торца:

$$S_T = \frac{F_{\text{эсрб}}}{39,8 \cdot 10^4 \cdot B_{\delta_{\text{от}}}^2} = \frac{0,189}{39,8 \cdot 10^4 \cdot 0,5^2} = 0,019 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (95)$$

Диаметр торца:

$$d_T = \sqrt{\frac{4 \cdot S_T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,019 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,156 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad (96)$$

Размер выступающей из катушки части сердечника можно принять равным $(0,2 \dots 0,5)d_T$.

Размер выступающей из катушки части сердечника равен:

$$0,2 \cdot d_T = 0,2 \cdot 0,00156 = 0,000312 \text{ м}. \quad (97)$$

Размеры обмотки зависят от величины намагничивающей силы срабатывания $(Iw)_{\text{обсрб}}$. Величина намагничивающей силы срабатывания складывается из падений магнитного потенциала в рабочих зазорах, нерабочих зазорах и на стальных участках магнитопровода.

Уравнение магнитной цепи при отпущенном якоре имеет вид:

$$(Iw)_{\text{обсрб}} = \Sigma H_{\delta_{\text{от}}} \cdot \delta_{\text{от}} + \Sigma H_{\text{нз}} \cdot \delta_{\text{нз}} + \Sigma H_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ст}} \quad (98)$$

Намагничивающая сила рабочих зазоров может быть определена по заданной величине индукции при отпущенном якоре и зазора:

$$U_{\delta_{\text{от}}} = \Sigma H_{\delta_{\text{от}}} \cdot \delta_{\text{от}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta_{\text{от}}} \cdot \Sigma \delta_{\text{от}} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,079 \cdot 10^4 \text{ В}. \quad (99)$$

Намагничивающая сила, приходящаяся на нерабочие зазоры и ферромагнитные участки магнитопровода, зависят от конструкции магнитопровода, величины магнитной индукции. В конструкциях, близких к оптимальным, намагничивающая сила срабатывания определяется:

$$(Iw)_{\text{обсрб}} = (1,2 - 1,6) U_{\delta_{\text{от}}} = 1,2 \cdot 0,079 \cdot 10^4 = 948 \text{ А}. \quad (100)$$

Площадь поперечного сечения обмотки $S_{\text{об}}$ при предварительном расчете определена по уравнению, связывающему значение намагничивающей силы с размерами обмотки и допустимой плотностью

тока, при заданном режиме работы:

$$S_{об} = \frac{K_{u\max} \cdot (Iw)_{обсрб}}{K_{u\min} \cdot K_{nm} \cdot j \cdot \kappa_{зм}}, \quad (101)$$

где $K_{u\max}$ - коэффициент, характеризующий максимальное значение напряжения, при котором температура обмотки не должна превосходить допустимую, в наиболее распространенных случаях $K_{u\max} = 1,05$;

$K_{u\min}$ - коэффициент характеризующий минимально возможное напряжение, при котором величина намагничивающей силы срабатывания $\Theta_{обсрб}$ должна быть достаточной (0,6...0,9). Принято $K_{u\min} = 0,6$;

j - плотность тока в проводниках обмотки, ограниченная температурой нагрева, для длительного режима работы можно принять $j = (2,0 \dots 4,0) 10^6 \text{ A/m}^2$;

K_{nm} - коэффициент перегрузки по току, характеризующий нагрузочную способность токоведущей части аппарата, при продолжительном режиме $k_{n.m} = 1$.

$\kappa_{зм}$ - коэффициент заполнения обмоточного пространства зависит от марки выбранного обмоточного провода, поэтому его можно рассматривать состоящим из трех коэффициентов $\kappa_{зм} = k_{\phi} k_n k_u$.

Здесь k_{ϕ} - коэффициент формы сечения проводника: для круглых $k_{\phi} = 1$;

K_n - коэффициент неравномерности намотки (укладки) (для круглых $k_n = 1$);

Принято $j = 3 \cdot 10^6 \text{ (A/m}^2\text{)}$;

$k_u = 1,05$ - коэффициент изоляции;

Тогда $\kappa_{зм} = 1 \cdot 1 \cdot 1,05 = 1,05$.

В итоге площадь поперечного сечения обмоточного пространства будет равна:

$$S_{об} = \frac{K_{u \max} \cdot (Iw)_{обсрб}}{K_{u \min} \cdot K_{nm} \cdot j \cdot \kappa_{зм}} = \frac{1,05 \cdot 948}{0,6 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 1,05} = 5,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (102)$$

Высота обмоточного пространства:

$$h_{обпр} = \sqrt{\frac{S_{обпр}}{m_l}}. \quad (103)$$

Длина обмоточного пространства:

$$l_{обпр} = \frac{S_{обпр}}{h_{обпр}}, \quad (104)$$

где m_l - относительная длина обмоточного пространства (по условиям отвода теплоты и приемлемой теплоемкости электромагнита целесообразно иметь $m_l = 4 \dots 7$, увеличение m_l приводит к уменьшению массы обмотки, увеличивая массу магнитопровода).

Принято: $m_l = 5,5$, тогда:

$$h_{обпр} = \sqrt{\frac{S_{обпр}}{m_l}} = \sqrt{\frac{5,27 \cdot 10^{-4}}{5,5}} = 0,009 \text{ м.}, \quad (105)$$

$$l_{обпр} = \frac{S_{обпр}}{h_{обпр}} = \frac{5,27 \cdot 10^{-4}}{0,009} = 0,056 \text{ м.}, \quad (106)$$

Катушка должна обеспечивать необходимую намагничивающую силу срабатывания электромагнита, температура ее нагрева не должна быть выше предельно допустимой для принятого класса нагревостойкости изоляции.

Нами принята бескаркасная катушка цилиндрической формы, так как катушки именно такого исполнения благодаря своей простоте и технологичности более предпочтительны, они имеют хорошую механическую и химическую стойкость, обеспечивающуюся при инкапсуляции, создающей защитный слой вокруг обмотки, и имеют наибольшее распространение для электромагнита постоянного тока.

Длина и высота обмотки при бескаркасной катушке:

$$l_{\text{КАТ}} = l_{\text{ОБ.ПР}} + 2(\Delta l + \Delta_{\text{КОР.И.}} + \Delta_{\text{Щ}}), \quad (107)$$

$$h_{\text{КАТ}} = \Delta_{\text{ВН.И.}} + h_{\text{ОБ.ПР}} + \Delta_{\text{КОР.И.}} + \Delta h, \quad (108)$$

где $\Delta_{\text{Щ}}$ - толщина щёчек, при проектировании можно принять: при бескаркасной намотке щечки $\Delta_{\text{Щ}} = (0,5 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$, (м). Принято: $\Delta_{\text{Щ}} = 1 \cdot 10^{-3}$, (м), $\Delta_{\text{КОР.И.}}$ - толщина корпусной изоляции катушки, принимается равной $(0,3 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$, (м). Принято: $\Delta_{\text{КОР.И.}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$, (м);

$\Delta_{\text{ВН.И.}}$ - толщина внутренней изоляции стержня сердечника, принимается равной $(0,3 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$, м. Принято: $\Delta_{\text{ВН.И.}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$, м.

$\Delta l, \Delta h$ - технологические припуски по длине и по высоте обмотки, соответственно, причем припуск по длине Δl для бескаркасных катушек может быть обусловлен выпучивание на торцах покровной изоляции, наплывами пропиточного лака либо компаунда, а припуск по высоте Δh учитывает выпучивание витков обмотки в средней по длине части катушки и наплывы.

Принять $\Delta l = (0,2 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$, м, $\Delta h = (0,4 \dots 0,7) \cdot 10^{-3}$, м.

Принять $\Delta l = 0,35 \cdot 10^{-3}$, м, $\Delta h = 0,55 \cdot 10^{-3}$, м.

$$l_{\text{КАТ}} = 0,055 + 2(0,35 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3}) = 0,0585, (\text{м}), \quad (109)$$

$$h_{\text{КАТ}} = 0,4 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3} + 0,55 \cdot 10^{-3} = 8,35 \cdot 10^{-3}, (\text{м}), \quad (110)$$

Внутренний диаметр круглой обмотки:

$$d_{\text{обвн}} = d_c + 2\Delta_{\text{вн}}, \quad (111)$$

$$d_{\text{об.вн}} = 0,024 + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 0,025 (\text{м}); \quad (112)$$

Наружный диаметр круглой обмотки:

$$d_{\text{обн}} = d_{\text{обвн}} + 2h_{\text{обр}}, \quad (113)$$

$$d_{\text{оби}} = 0,025 + 2 \cdot 0,007 = 0,0039, \quad (114)$$

Внутренний диаметр катушек:

$$d_{\text{катвн}} = d_c = 0,024 \text{ м.} \quad (115)$$

Внешний диаметр катушек:

$$d_{\text{катн}} = d_{\text{катвн}} + 2(\Delta_{\text{вни}} + h_{\text{обр}} + \Delta_{\text{кориз}} + \Delta h), \quad (116)$$

$$d_{\text{катн}} = 0,0248 + 2 \cdot (0,007 + 0,4 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3} + 0,55 \cdot 10^{-3}) = 0,0415, \quad (117)$$

Площадь наружной поверхности катушки цилиндрической формы:

$$s_{\text{катн}} = \pi \cdot d_{\text{катн}} \cdot l_{\text{кат}}, \quad (118)$$

$$S_{\text{кат.н}} = 3,14 \cdot 0,0415 \cdot 0,0585 = 7,62 \cdot 10^{-3}, (\text{м}^2), \quad (119)$$

Площадь торцевой поверхности катушки цилиндрической формы:

$$S_{\text{кат.т}} = \frac{\pi(d_{\text{кат.н}}^2 - d_{\text{кат.вн}}^2)}{4}, \quad (120)$$

$$S_{\text{кат.т}} = \frac{3,14 \cdot (0,0415^2 - 0,0248^2)}{4} = 8,69 \cdot 10^{-4}, (\text{м}^2). \quad (121)$$

Площадь внутренней поверхности катушки цилиндрической формы:

$$s_{\text{катвн}} = \pi \cdot d_{\text{катвн}} \cdot l_{\text{кат}}, \quad (122)$$

$$S_{\text{кат.вн}} = 3,14 \cdot 0,0248 \cdot 0,0585 = 4,6 \cdot 10^{-3}, (\text{м}^2), \quad (123)$$

Определение длины сердечника электромагнита с внешним притягиваемым якорем.

В нашем случае в электромагнитах без полюсного наконечника длина сердечника определена из выражения:

$$l_c = l_{\text{кат}} + h_{\text{вс}} \quad (124)$$

где $h_{\text{в.с.}}$ - выступающая часть сердечника, используемая для крепления катушки выбирается из конструктивных соображений в пределах $h_{\text{в.с.}} = (1...3) \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Принимаем $h_{в.с.} = 3 \cdot 10^{-3}$, (м).

$$l_c = 0,0585 + 0,003 = 0,0615, (м). \quad (125)$$

Определение размеров и площади сечения ярма (основания скобы).

Ширину ярма рекомендуется принять:

Для цилиндрической катушки $b_{яр} = 1,2d_{кат.н} = 0,05$ (м);

Толщина ярма (основания):

$$a_{яр} = a_{ск} = 0,01 \text{ (м)}; \quad (126)$$

Площадь сечения ярма (основания):

$$s_{яр} = b_{яр} \cdot a_{яр}, \quad (127)$$

$$S_{яр} = 0,05 \cdot 0,01 = 5 \cdot 10^{-4}, (м^2). \quad (128)$$

Определение площади и размеров сечения якоря.

Площадь сечения якоря принята равной:

$$s_{як} \approx s_c = 4,5 \cdot 10^{-4} (м^2); \quad (129)$$

Ширина якоря сердечника без полюсного наконечника:

$$b_{як} = (1,1...1,25) \cdot d_c, \quad (130)$$

$$b_{як} = 1,175 \cdot 0,024 = 0,0282, (м). \quad (131)$$

Толщина якоря:

$$a_{як} = \frac{s_{як}}{b_{як}}, (м), \quad (132)$$

$$a_{як} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{0,0282} = 0,016, (м). \quad (133)$$

Длина ярма (основания) для электромагнита при разработке принята как:

$$l_{яр} = 1,2d_{кат.и} + a_{ск}, \quad (134)$$

$$l_{яр} = 1,2 \cdot 0,0415 + 0,01 = 0,06 (м). \quad (135)$$

Длина внешнего плоского якоря для электромагнита клапанного типа

без полюсного наконечника:

$$l_{\text{як}} = 1,2 \cdot \frac{d_{\text{кат.н}}}{2} + 1,15 \cdot \frac{d_{\text{с}}}{2} + a_{\text{ск}}, (\text{м}), \quad (136)$$

$$l_{\text{як}} = 1,2 \cdot \frac{0,0415}{2} + 1,15 \cdot \frac{0,024}{2} + 0,01 = 0,049 (\text{м}). \quad (137)$$

Определение сечения и размеров скобы

Сечение скобы принимается равной сечению сердечника:

$$S_{\text{як}} \geq S_{\text{с}} (\text{м}^2); \quad (138)$$

$$S_{\text{ск}} = 4,5 \cdot 10^{-4}, (\text{м}^2). \quad (139)$$

Ширину скобы $b_{\text{ск}}$ целесообразно принимать близкой к наружному диаметру катушки т.е.

$$b_{\text{ск}} = d_{\text{кат.н}} = 0,0415, (\text{м}). \quad (140)$$

Принимаем:

$$b_{\text{ск}} = 0,04, (\text{м}). \quad (141)$$

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

$$a_{\text{ск}} = \frac{S_{\text{ск}}}{b_{\text{ск}}}, (\text{м}), \quad (142)$$

$$a_{\text{ск}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{0,04} = 0,01, \text{м} . \quad (143)$$

Длина скобы для электромагнита без полюсного наконечника:

$$l_{\text{ск}} = l_{\text{с}} + a_{\text{яп}} + 2\Delta l \quad (144)$$

$$l_{\text{ск}} = 0,0615 + 0,01 + 2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} = 0,072, (\text{м}). \quad (145)$$

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

К рабочим воздушным зазорам относят эквивалентный по магнитной

проводимости расчётный воздушный зазор $\delta_{Т1}$, обусловленной обработки деталей:

Так как нами выбрана сталь марки Ст05 принято значение $\delta_{Т1} = 50 \cdot 10^{-6}, (м)$.

К нерабочим воздушным зазорам электромагнитов относят:

Зазор между плоским якорем и скобой $\delta_{я.ск.}$, который изменяется от величины, равной $\delta_{ц.з.}$, до наибольшей величины при полностью отпущенном якоре $\delta_{отп.} = (0,05...0,08) \cdot 10^{-3}$, м. Принимаем $\delta_{отп.} = 0,65 \cdot 10^{-3}$, м.

За расчетные величины электромагнитов принимаются зазоры в середине скобы в месте расположения средней линии магнитного потока. Цилиндрический зазор в месте сочленения сердечника и скобы, длина которого при наличии гайки равна толщине скобы, величина зазора зависит от конструкции сочленения $\delta_{ц.з.} = (0,01...0,2) \cdot 10^{-3}$, м.

Принимаем $\delta_{ц.з.} = 0,1 \cdot 10^{-3}$, м.

Тогда $\delta_{я.ск.} = \delta_{отп.} - \delta_{ц.з.}$, м.

$$\delta_{я.ск.} = 0,65 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,55 \cdot 10^{-3}, м. \quad (146)$$

Разработка эскиза электромагнита.

На основании проведенных расчетов выполняется эскиз общего вида катушки как узла электромагнита и электромагнита в целом (рисунок 2). Эскизы должны давать полное представление об установочных и габаритных размерах, обмоточных и изоляционных материалов.

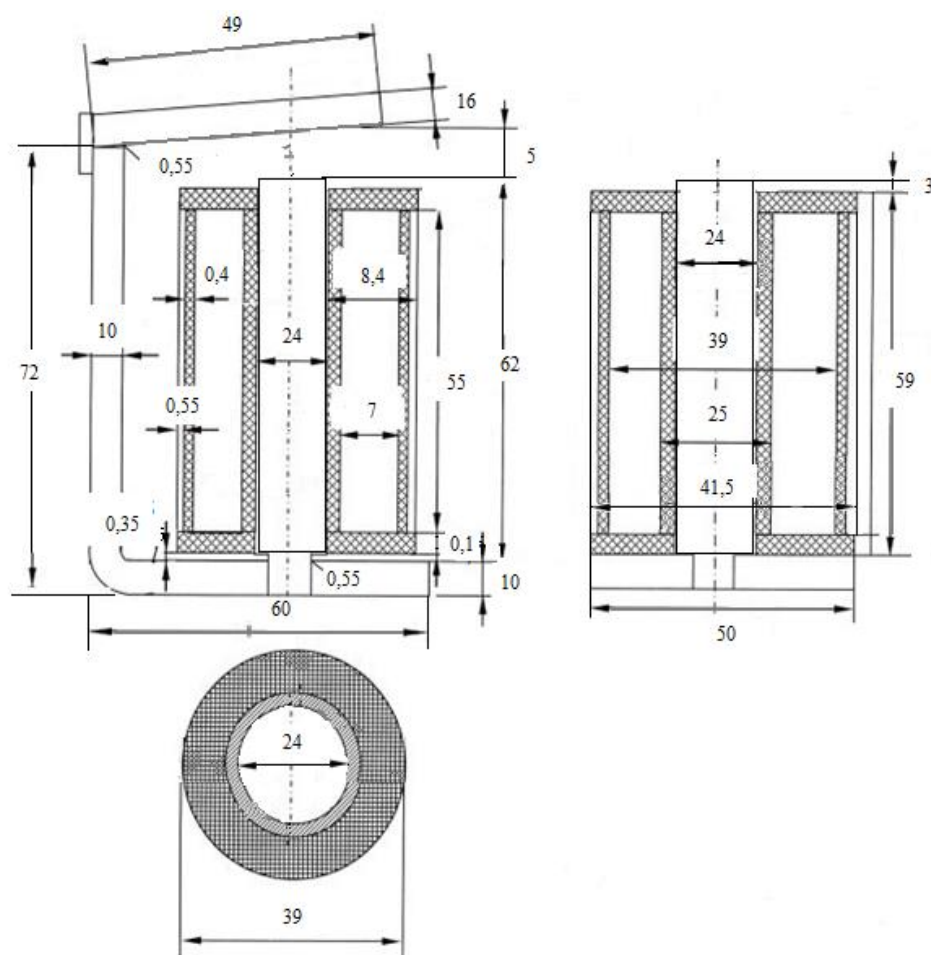


Рисунок 2. Эскиз общего вида катушки.

Определение параметров обмотки.

Между конструктивными размерами катушки (ее каркаса и изоляционных деталей внутренней, промежуточной и наружной изоляции) и обмоточными данными (диаметром провода, выбранной маркой провода, числом витков и омическим сопротивлением обмотки) существуют определенные соотношения, которыми определяется намагничивающая сила (н.с.) обмотки.

Под «обмоткой» понимается часть катушки, занятой проводом, а катушка рассматривается как узел электромагнита. Катушке необходимо обеспечить необходимую силу срабатывания электромагнита, температура ее нагрева не должна превышать предельно допустимой для принятого класса нагревостойкости изоляции.

Обмотки последовательного включения, работающие при заданном

токе, выполняют с малым числом витков большого сечения. Ток, проходящий по такой обмотке, почти не зависит от ее параметров, а определяется характеристиками потребителей, включенных последовательно с обмоткой.

Выбраны: 1) тип провода ПЭТВ-2, исполнение изоляции – теплостойкая и лакостойкая эмаль в два слоя, область применения – при повышенных тепловых нагрузках, и 2) бескаркасная катушка цилиндрической формы из-за её простоты, технологичности и хороших характеристик, рядовую без прокладок (витки располагаются достаточно плотно друг к другу и находятся точно над витками предыдущего слоя);

В зависимости от способа намотки меняется значение коэффициента заполнения обмотки: рядовая без прокладок $k_{з.об.}=0,75 \dots 0,85$. Выбрав способы намотки и изготовления катушки, а также материал каркаса и покровной изоляции, можно приступить к расчету основных параметров.

Задача расчета обмотки заключается в определении обмоточных данных (диаметра провода $d_{з.н.}$, число витков w и сопротивления обмотки R), которые при заданном условии питания обеспечивают необходимую намагничивающую силу.

Расчет катушки последовательного сечения основан на определении параметров, характеризующих обмотку, обеспечивающую необходимую н.с.

Расчет последовательной обмотки постоянного тока.

Определение количества витков и сечения меди проводника круглого сечения:

$$w = f_k \cdot \frac{l_k \cdot H_k}{q}, \quad (147)$$

где $l_k = 0,0585$ м - длина обмотки,

$H_k = 0,036$ м - толщина обмотки,

f_k - коэффициент заполнения катушки.

$$f_k = 0,85$$

Рассчитаем количество витков:

$$w = 0,85 \cdot \frac{58,5 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-6}} = 478. \quad (148)$$

$$s_M = \frac{l_{об.пр} \cdot h_{об.пр} \cdot k_{з.об.р.}}{w}. \quad (149)$$

$$s_M = \frac{0,55 \cdot 0,007 \cdot 0,8}{478} = 6,443 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (150)$$

Размеры проводника обмотки:

$$s_M = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.. \quad (151)$$

$$d_{э.н.} = \sqrt{\frac{4s_M}{\pi}}. \quad (152)$$

$$d_{э.н.} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,4 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (153)$$

Размеры провода принять:

$$d_{э.н.} = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (154)$$

Сопротивление обмотки в нагретом состоянии:

$$R = \frac{l_{срв} \cdot w}{S_M}. \quad (155)$$

$$l_{срв} = \pi \frac{(d_{обвн} + d_{обв})}{2}. \quad (156)$$

$$l_{срв} = 3,14 \frac{(0,0248 + 0,0415)}{2} = 0,1 \text{ м}. \quad (157)$$

$$R = \frac{1,86 \cdot 10^{-8} \cdot 478 \cdot 0,1}{6,4 \cdot 10^{-6}} = 0,04 \text{ Ом}, \quad (158)$$

Допустимая плотность тока:

$$j_{дон} = \frac{I_H}{S_M}, \quad (159)$$

$$j_{дон} = \frac{5}{6,4 \cdot 10^{-6}} = 0,78 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2, \quad (160)$$

Длина обмоточного провода:

$$l_M = l_{срв} \cdot w, \quad (161)$$

$$l_M = 0,1 \cdot 478 = 47,8 \text{ м.} \quad (162)$$

Электрические потери в катушке:

$$P_{\max} = I^2 \cdot R, \quad (163)$$

$$P_{\max} = 5^2 \cdot 0,04 = 1 \text{ Вт.} \quad (164)$$

Поверочный расчет электромагнита.

Порядок расчета, основой которого является эскиз электромагнита с размерами, следующий:

1. Составление электрической схемы замещения.
2. Определение магнитных проводимостей воздушных зазоров.
3. Расчет коэффициентов рассеяния;
4. Определение необходимого магнитного потока в рабочем воздушном зазоре (критическом) по энергетической формуле.
5. Расчет магнитной цепи по участкам с использованием коэффициентов и кривой намагничивания; построение силовых характеристик.
6. Расчет и построение тяговой характеристики по силовым характеристикам.

Составление электрической схемы замещения.

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

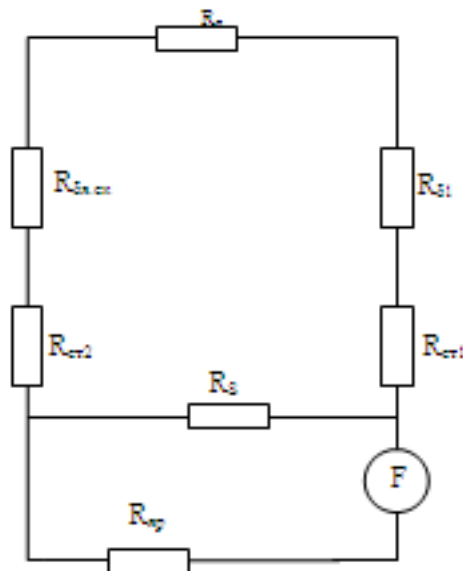


Рисунок 3. Схема замещения электромагнита постоянного тока

Сопротивления:

$R_{я}$ – якоря,

$R_{\delta 1}$ - рабочего воздушного зазора,

$R_{\delta \text{я.ск}}$ – не рабочий воздушный зазор,

$R_{ст1}$, $R_{ст2}$ - в стали сердечника,

$R_{яр}$ - ярма,

R_s - потоков рассеяния.

Определение магнитных проводимостей воздушных зазоров и промежутков.

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

Магнитные проводимости рабочего зазора между торцом плоского цилиндрического полюса и наклоненного под углом плоским якорем (Рисунок 4):

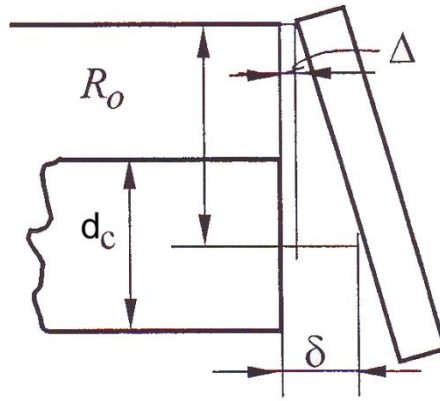


Рисунок 4. Эскиз к расчёту проводимостей рабочего воздушного зазора

d_c – диаметр сердечника магнитопровода

R_o – расстояние от оси полюсного наконечника до скобы

δ – величина рабочего воздушного зазора

Δ – величина нерабочего воздушного зазора

$$G_{\delta 1} = \mu_0 \left(\frac{S_c}{\delta} \cdot X_2 + 1,16 \cdot d_c \right)$$

где X_2 – поправочный коэффициент:

$$X_2 = \frac{\rho_2}{2} \ln \frac{\rho_2 + 1}{\rho_2 - 1}. \quad (165)$$

ρ_2 – относительная величина, зависящая от соотношений конструктивных размеров постоянной и переменной частей воздушных зазоров:

$$\rho_2 = \frac{2R}{d_c \left(1 + \frac{\Delta}{\delta} \right)}. \quad (166)$$

Здесь $\Delta = \delta_{\text{як.ск.}}$ – величина нерабочего воздушного зазора между якорем и скобой, м

$$R_0 = \frac{d_{\text{кат.н}}}{2} + a_{\text{ск}} + (0,8 \dots 2) a_{\text{ск}}, \quad (167)$$

$$R_0 = \frac{0,0415}{2} + 0,01 + 0,8 \cdot 0,01 = 0,039, \text{ м} . \quad (168)$$

$$p_2 = \frac{2 \cdot 0,039}{0,01 \cdot \left(1 + \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}}\right)} = 7,02. \quad (169)$$

$$X_2 = \frac{7,02}{2} \ln \frac{7,02 + 1}{7,02 - 1} = 1,01 . \quad (170)$$

$$G_{\delta 1} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,01 + 1,16 \cdot 0,024 \right) = 1,488 \cdot 10^{-7}, \text{ Гн} \quad (171)$$

Производная проводимости:

$$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} = -\mu_0 \frac{S_c}{\delta^2} X_2 . \quad (172)$$

$$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} = -4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{(5 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 1,01 = -2,276 \cdot 10^{-5} . \quad (173)$$

Магнитная проводимость воздушных промежутков в месте сочленения сердечника и ярма (Рисунок 5):

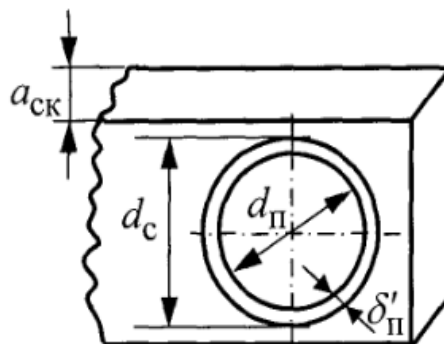


Рисунок 5. Эскиз к расчёту магнитной проводимости воздушных промежутков в месте сочленения сердечника и ярма

d_c — диаметр сердечника магнитопровода

d_{Π} — диаметр посадки

δ_{Π}' — зазор в месте сочленения скобы и сердечника

$a_{ск}$ — толщина скобы.

$$G_{\text{сяр}} = \mu_0 \left(\frac{\pi d_c^2}{4} - \frac{\pi d_p^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{\delta'_\pi} + \mu_0 \cdot \frac{\pi d_p \cdot a_{\text{ск}}}{\delta_{\tau 1}}, \text{ Гн} . \quad (174)$$

где d_n - диаметр посадки, м; с учетом обеспечения жесткости крепления принимаем $d_n = 0,3 \cdot d_c$.

$$d_n = 0,3 \cdot 0,024 = 0,0072 \text{ м}; \quad (175)$$

δ'_π - зазор в месте сочленения сердечника и скобы, зависящий от конструкции сочленения, м;

цилиндрический зазор, длина которого при наличии гайки равна толщине основания скобы $\delta'_\pi = 2\delta_{\tau 1} \cdot a_{\text{яр}}, (\text{м})$;

$\delta_{\tau 1}$ - зазор обусловленный технологией обработки деталей.

$$\delta_{\tau 1} = 5 \cdot 10^{-5}, \text{ м} \quad (176)$$

$$\delta'_\pi = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01 = 1 \cdot 10^{-6}, \text{ м} \quad (177)$$

$$G_{\text{ср}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\pi \cdot 0,024^2}{4} + \frac{\pi \cdot 0,0072^2}{4} \right) \frac{1}{1 \cdot 10^{-6}} + 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\pi \cdot 0,0072 \cdot 0,01}{5 \cdot 10^{-6}} = 5,22 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}. \quad (178)$$

Магнитная проводимость путей потока рассеяния для цилиндра, параллельного плоскости (Рисунок 6):

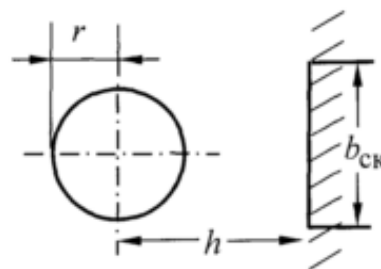


Рисунок 6. Эскиз к расчёту магнитной проводимости потока рассеяния участков цепи для цилиндра, параллельного плоскости

r – радиус сердечника магнитопровода

h – протяжённость потока рассеяния, $b_{\text{ск}}$ – ширина скобы.

Так как $b_{\text{ск}}/h = 0,0415/0,029 = 1,43$, тогда $k = 0,2 \dots 0,85$ принимаем $k = 0,5$

$$G_{\sigma} = \mu_0 \frac{2\pi \cdot l_{\text{кат}} \cdot k}{\ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}}, \text{ Гн}, \quad (179)$$

где $h = \frac{d_{\text{кат.н}}}{2} + (0,8 \dots 2) \alpha_{\text{ск}}, \text{ м}$ -протяженность потока рассеяния.

$$h = \frac{0,0415}{2} + 0,8 \cdot 0,01 = 0,029, \text{ м} \quad (180)$$

r - радиус цилиндра;

$$r = \frac{d_c}{2}. \quad (181)$$

$$r = \frac{0,024}{2} = 0,012, (\text{м}), \quad (182)$$

$$G_{\sigma} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi \cdot 0,0585 \cdot 0,5}{\ln \frac{0,029 + \sqrt{0,029^2 - 0,012^2}}{0,012}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \quad (183)$$

Магнитная проводимость нерабочего воздушного зазора без учета выпучивания магнитного потока (Рисунок 7):

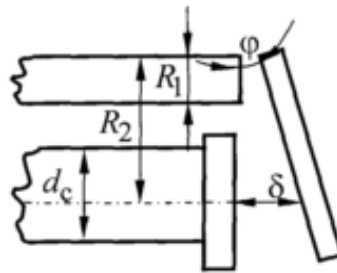


Рисунок 7. Эскиз к расчёту магнитной проводимости нерабочего воздушного зазора

R_1 – расстояние от оси сердечника магнитопровода до конца скобы

R_1 – толщина скобы

d_c – диаметр сердечника магнитопровода

δ – величина рабочего воздушного зазора.

$$G_{\sigma 1} = \mu_0 \frac{\delta}{\varphi} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (184)$$

где R_2, R_1 рассчитываются в соответствии с рисунком,

φ - угол, характеризующий конструктивную изменяющуюся часть нерабочего воздушного зазора, $\varphi = 15^\circ$

$$G_{\sigma 1} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{0,005}{15} \ln \frac{0,039}{0,01} = 5,7 \cdot 10^{-10}, (\text{Гн}). \quad (185)$$

Удельная магнитная проводимость потока рассеяния, отнесенная к единице длины участка при равномерно распределенной по сердечнику намагничивающей силе:

$$g_{\sigma} = \frac{G_{\sigma}}{l_{\sigma}}, (\text{Гн/м}), \quad (186)$$

$$g_{\sigma} = \frac{1,5 \cdot 10^{-7}}{0,0585} = 2,56 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (187)$$

Суммарная магнитная проводимость между якорем и сердечником:

$$G_{\Sigma \text{я.с}} = G_{\delta 1} = 1,488 \cdot 10^{-7} (\text{Гн}); \quad (188)$$

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

$$G_{\Sigma \delta \text{я.с}} = \frac{G_{\Sigma \text{я.с}} \cdot G_{\text{с.я.р}}}{G_{\Sigma \text{я.с}} + G_{\text{с.я.р}}} \quad (189)$$

$$G_{\delta \text{я.с}} = \frac{1,488 \cdot 10^{-7} \cdot 5,22 \cdot 10^{-4}}{1,488 \cdot 10^{-7} + 5,22 \cdot 10^{-4}} = 1,487 \cdot 10^{-7}, (\text{Гн}). \quad (190)$$

Максимальный магнитный поток Φ_{max} , разделяющий магнитную цепь на части, каждая из которых содержит воздушный зазор (рисунок 8):

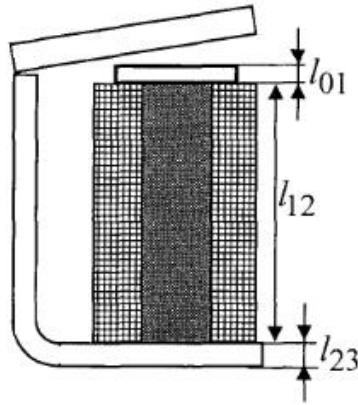


Рисунок 8. Эскиз к расчету магнитной проводимости воздушных промежутков магнитопровода с внешним притягиваемым якорем

l_{01} – высота выступающей части

l_{12} – высота катушки

l_{23} – толщина ярма

Расчетные длины сердечника, в которых расположены воздушные зазоры определены по следующим выражениям:

$$l_c = l_{01} + l_{12} + l_{23}. \quad (191)$$

$$l_{01} = h_{в.с.} \cdot \frac{2G_{\Sigma я.с} + g_{\sigma} \cdot h_{в.с.}}{2(G_{\delta 2} + G_{\Sigma я.с} + g_{\sigma} \cdot h_{в.с.})}, (м), \quad (192)$$

$$l_{01} = 0,003 \cdot \frac{2 \cdot 1,488 \cdot 10^{-7} + 2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003}{2(1,488 \cdot 10^{-7} + 2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003)} = 0,003(м); \quad (193)$$

$$l_{12} = l_{об} \cdot \frac{2G_{сяр} + g_{\sigma} \cdot l_c}{2(G_{\Sigma \delta яс} + G_{сяр} + g_{\sigma} \cdot l_c)}, \quad (194)$$

$$l_{12} = 0,055 \cdot \frac{2 \cdot 5,22 \cdot 10^{-4} + 2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0615}{2 \cdot (1,488 \cdot 10^{-7} + 5,22 \cdot 10^{-4} + 2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0615)} = 0,055, (м); \quad (195)$$

$$l_{23} = l_c - l_{12}. \quad (196)$$

$$l_{23} = 0,0615 - 0,055 = 0,0065, м; \quad (197)$$

Суммарная магнитная проводимость воздушных промежутков магнитопровода:

$$G_{\Sigma 03} = \frac{G_{\Sigma 01} \cdot G_{\Sigma 12} \cdot G_{\Sigma 23}}{G_{\Sigma 01} + G_{\Sigma 12} + G_{\Sigma 23}}, (\text{Гн}); \quad (198)$$

$$G_{\Sigma 01} = G_{\Sigma \text{я.с}} = 1,488 \cdot 10^{-7} (\text{Гн}); \quad (199)$$

$$G_{12} = G_{\text{я.с}} + \frac{l_{12}}{2} \quad (200)$$

$$G_{12} = 1,487 \cdot 10^{-7} + \frac{2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055}{2} = 2,196 \cdot 10^{-7}, (\text{Гн}); \quad (201)$$

$$G_{23} = G_{\text{я.р}} + \frac{l_{23}}{2}. \quad (202)$$

$$G_{23} = 5,22 \cdot 10^{-4} + \frac{2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0065}{2} = 5,22 \cdot 10^{-4}, (\text{Гн}); \quad (203)$$

$$G_{\Sigma 03} = \frac{1,488 \cdot 10^{-7} \cdot 2,196 \cdot 10^{-7} \cdot 5,22 \cdot 10^{-4}}{1,488 \cdot 10^{-7} + 2,196 \cdot 10^{-7} + 5,22 \cdot 10^{-4}} = 9,7 \cdot 10^{-11} (\text{Гн}). \quad (204)$$

Расчет 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 σ_x представляет собой отношение полной величины потока, проходящего через рассматриваемое сечение сердечника на его длине x к величине потока, проходящего через ближайший последовательно расположенный в цепи воздушный зазор. Когда воздушные зазоры рабочие и нерабочие или оба рабочие 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 $\Phi_{\text{макс}}$.

Два последовательных зазора:

$$\sigma_{12} = \frac{\Phi_2}{\Phi_\delta} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta 12}}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{g \cdot l_{12}}{2 \cdot G_{\Sigma 13}}, \quad (205)$$

$$\Phi_\delta = \Theta_{12} \frac{G_{\delta 1} \cdot G_{\delta 2}}{G_{\delta 1} + G_{\delta 2}} = \Theta_{12} \cdot G_{\Sigma 03}, \quad (\text{Вб})$$

здесь - магнитный поток в

воздушном зазоре;

$$\Phi_{\sigma 12} = \frac{\Theta_{12}}{2R_\delta} = \Theta_{12} \frac{G_{\sigma 12}}{2} = \Theta_{12} \cdot \frac{g_{\sigma} \cdot l_{12}}{2}, \quad (\text{Вб})$$

- магнитный поток рассеяния

на участке 1-2;

$$\sigma_{12} = 1 + \frac{2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055}{2 \cdot 1,488 \cdot 10^{-7}} = 1,476; \quad (206)$$

$$\sigma_{23} = \frac{\Phi_2}{\Phi_3} = \frac{\Phi_3 + \Phi_{\sigma 23}}{\Phi_3} = 1 + \frac{g_{\sigma} \cdot l_{23}}{2 \cdot G_{\Sigma \text{яп}}}, \quad (207)$$

$$\Phi_3 = \Theta_{23} \cdot G_{\Sigma \text{яп}}, \quad (\text{Вб})$$

здесь - магнитный поток на участке 2-3;

$$\Phi_{\sigma 23} = \Theta_{23} \cdot \frac{G_{\Sigma 23}}{2} = \Theta_{23} \cdot \frac{g_{\sigma} \cdot l_{23}}{2}, \quad (\text{Вб})$$

- магнитный поток рассеяния на

участке 2-3;

$$\sigma_{23} = 1 + \frac{2,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0065}{2 \cdot 5,22 \cdot 10^{-4}} = 1. \quad (208)$$

Определение необходимого магнитного потока в рабочем воздушном зазоре (критическом) по энергетической формуле

Как и в предварительном расчете, исходной величиной является сила срабатывания электромагнита $F_{\text{эл.срб}}$, равная расчетной критической противодействующей силе, приведенной к рабочему воздушному зазору $F'_{\text{м.кр}}$.

$$F_{\text{элсрб}} = F'_{\text{мкр}}$$

Для электромагнитов с внешним притягиваемым якорем, когда поток рассеяния не создает добавочной силы, электромагнитная сила.

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \cdot \Theta_\delta^2 \cdot \frac{dG_\delta}{d\delta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi_\delta^2}{G_\delta^2} \cdot \frac{dG_\delta}{d\delta}, \quad (\text{Н}), \quad (209)$$

следовательно магнитный поток в рабочем воздушном зазоре:

$$\Phi_{\delta} = \sqrt{\frac{2G_{\delta}^2 \cdot F_{\text{эл}}}{\frac{dG_{\delta}}{d\delta}}} \quad (210)$$

$$\Phi_{\delta} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,488 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 2,15}{2,276 \cdot 10^{-5}}} = 6,46 \cdot 10^{-5}, \text{ (Вб)}. \quad (211)$$

Построение тяговой характеристики.

Электромагнитную силу в рабочем воздушном зазоре определим по энергетической формуле:

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\delta}^2}{G_{\delta}^2} \cdot \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \quad (212)$$

где $F_{\text{эл}}$ - электромагнитная сила, Н;

Φ_{δ} - падение магнитного напряжения в рабочем зазоре, А;

$\frac{dG_{\delta}}{d\delta}$ - производная магнитной проводимости рабочего зазора, $\frac{\Gamma_{\text{н}}}{\text{м}}$.

Подставим в формулу значения:

$$F_{\text{эл}1} = \frac{1}{2} \frac{(6,46 \cdot 10^{-5})^2}{(1,488 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 1,413 \cdot 10^{-4} = 13,316 \text{ Н}, \quad (213)$$

$$F_{\text{эл}2} = \frac{1}{2} \frac{(6,46 \cdot 10^{-5})^2}{(1,488 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 2,512 \cdot 10^{-4} = 23,673 \text{ Н}, \quad (214)$$

$$F_{\text{эл}3} = \frac{1}{2} \frac{(6,46 \cdot 10^{-5})^2}{(1,488 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 5,652 \cdot 10^{-4} = 53,264 \text{ Н}, \quad (215)$$

$$F_{\text{эл}4} = \frac{1}{2} \frac{(6,46 \cdot 10^{-5})^2}{(1,488 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 2,261 \cdot 10^{-3} = 213,074 \text{ Н}, \quad (216)$$

По полученным данным строим тяговую характеристику электромагнита:

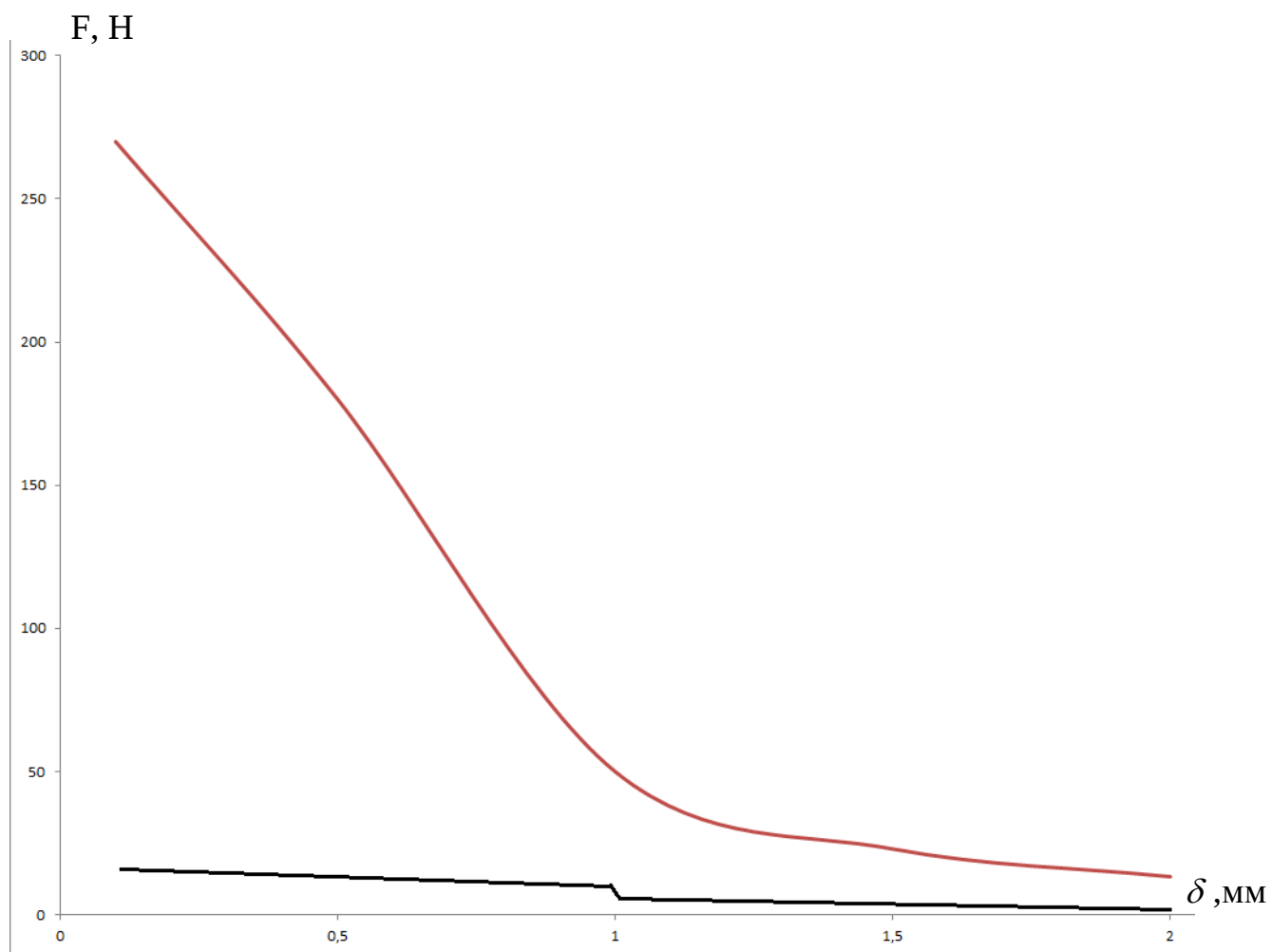


Рисунок 9. Тяговая характеристика.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были изучены виды электромагнитных реле, принцип работы. Выбран по заданным условиям прототип электромагнитного реле. Для него произведены расчеты токоведущего контура и его частей, сечения шины, сечения проводника по номинальному току, коммутирующих контактов, дугогасительной системы, механической характеристики, пружин, основных размеров сердечника и катушки электромагнита переменного тока. Все расчеты проведены согласно ГОСТ, значения входят в допустимые пределы, при необходимости проведены проверки расчетов.

В ходе выполнения работы была доказана конкурентоспособность аппарата, проведен SWOT-анализ, планирование, которое ограничило выполнение работы в 116 дней. Также был посчитан бюджет, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

Был проведен анализ вредных факторов: недостаточное освещение рабочего места, повышенный уровень электромагнитных излучений.

Выявлены опасные факторы: нестабильная подача электрического тока, пожароопасность, уровень статического электричества, повышенное значение напряжения в электрической цепи. К чрезвычайной ситуации отнесли выход из строя систем управления и коммутации.

Был разработан технологический процесс общей сборки электромагнитного реле переменного тока. Конструкция была отработана на технологичность, то есть было проанализировано удобство изделия для использования: подготовку его к работе, техническому обслуживанию, ремонту, обновлению, обеспечению требований безопасности. Изделие подходит для крупносерийного производства. Также, в данной работе был составлен процесс сборки.