

**Министерство путей сообщения Российской Федерации**  
**Дальневосточный государственный университет путей сообщения**

**Департамент электроэнергетики**

**Кафедра "Электроснабжение транспорта"**

**К. И. Фоков**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ**

**Методическое пособие к выполнению курсового проекта**  
**для специальности 1002, 1004**

**Хабаровск**

**2000**

Фоков К.И. Электрические аппараты: Методическое пособие к выполнению курсового проекта. - Хабаровск : ДВГУПС, 2000 г. - 37 с.

В методическом пособии изложена методика и последовательность расчета электромагнита для коммутационных аппаратов низкого напряжения постоянного тока. Рассматриваются вопросы расчета магнитной цепи, оптимизации конструктивных параметров, разработка конструкции и тепловые расчеты обмотки электромагнита.

Пособие рассчитано для студентов, обучающихся по специальностям 1002, 1004 "Электроснабжение"; может быть использовано при выполнении расчетов электромагнитов в условиях производства.

Рис. 6, табл. 12, список литер. 10 назв.

С Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), 2000 г.

## Содержание

### Введение

1. Задачи. Объем проекта. Исходные данные

2. Общая характеристика, методики расчета электромагнита

3. Предварительный расчет ядра электромагнита

4. Разработка конструкции электромагнита

5. Проектный расчет основных параметров электромагнита

6. Определение проектных параметров катушки

7. Расчет теплового режима обмотки

8. Определение стоимостных показателей электромагнита

9. Выводы по результатам расчета

Приложение 1

Приложение 2

Приложение 3

Приложение 4

Список литературы

## **Введение**

Настоящее пособие предназначено для выполнения курсового проекта по дисциплине “Электрические аппараты”. Для расчета выбран наиболее широко распространенный элемент электрических аппаратов, обеспечивающий их надежное функционирование – электромагнит. Учитывая достаточную сложность и громоздкость расчета магнитных цепей, предлагается инженерный метод расчета, который базируется на большом экспериментальном и теоретическом материале, используемом в [1,2,3].

В предлагаемой методике на базе простейших соотношений, определяющих расчет магнитных цепей, получены оптимальные конечные результаты путем введения ряда экспериментально определяемых параметров. Разработка электромагнита предусматривает выполнение предварительного расчета, позволяющего принять основные конструктивные параметры, и окончательного проектного расчета. Пособие предназначено для студентов специальностей 1002, 1004 “Электроснабжение” и может быть использовано производственным персоналом, связанным с эксплуатацией и ремонтом электромагнитных аппаратов.

### **1. Задачи, объем проекта и исходные данные**

Целью разработки курсового проекта является практическое применение студентами теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины “Электрические аппараты” путем решения конкретных инженерных задач и приобретение ими навыков в проектировании основных элементов электрических аппаратов.

Расчет электромагнита электрического аппарата выполняется в объеме технического проекта с разработкой эскиза конструкции электромагнита, расчета основных его элементов и технических показателей.

В методических указаниях даются рекомендации по выполнению разделов проекта. С целью развития самостоятельности и умения принимать инженерные решения предполагается широкое использование учебной справочной и нормативной литературы, а также практического опыта разработки электромагнитных устройств при проведении необходимых расчетов и обосновании полученных результатов.

Исследовательская тематика проекта определяется преподавателем в индивидуальном задании.

Курсовой проект представляется в виде пояснительной записки, оформленной в соответствии с требованиями ГОСТ [4], которая должна содержать:

1. содержание;
2. введение;
3. исходные данные;
4. расчетно-текстовую часть с разбивкой на разделы;
5. графическую часть;
6. выводы по результатам проектирования;
7. перечень используемой литературы.

Графическая часть представляется одним листом чертежей формата А2 с разработкой чертежа проектируемого электромагнита в масштабе 1:1 в трех (двух) проекциях.

Принимаемые решения и используемые расчетные выражения обосновываются ссылкой на источник.

Исходные данные для разработки проекта электромагнита (ЭМ) приведены в приложении 1 настоящего методического пособия и задаются в задании номерами вариантов и таблиц.

Последовательность и методику разработки проекта электромагнита, изложенную в настоящих методических указаниях, следует рассматривать как рекомендательную, которая может корректироваться разработчиком в соответствии с накопленным опытом и новыми методиками расчета.

## **2. Общая характеристика методики расчета электромагнита, выбор исходных данных**

Электромагнитные устройства входят в состав значительной части коммутационных аппаратов (особенно низкого напряжения), реле, устройств дистанционного управления, тормозных и подъемных устройств. Поэтому вопросы расчета и проектирования, обеспечивающие надежность и экономичность их работы, являются актуальной задачей. Однако при кажущейся простоте конструкции полный учет всех факторов, влияющих на работу ЭМ в аналитической форме, приемлемой для инженерных расчетов, встречает затруднения в связи со сложностью электромагнитных и тепловых процессов в элементах аппарата. Предлагаемая для использования в курсовом проекте методика расчета ЭМ основывается на использовании упрощенных расчетных формул, обеспечивающих приемлемую точность за счет применения установленных экспериментально ряда корректирующих и конструктивных коэффициентов. Очевидно, что рекомендуемые значения этих коэффициентов нельзя считать безусловными, а наоборот, требующими дальнейшей оптимизации с учетом накопленного опыта проектирования.

Конструкция ЭМ в основном определяется требованием создания необходимой электромагнитной силы при определенных условиях нагрева и

охлаждения катушки, то есть зависит от размеров магнитопровода, наличия рабочих и нерабочих зазоров, размеров и обмоточных данных катушки. Остальные элементы конструкции в меньшей степени влияют на работу ЭМ. Поэтому целесообразно ввести некоторые характерные для принятой методики расчета понятия:

- ядро ЭМ – часть ЭМ, состоящая из втягивающей катушки, участка магнитопровода, охватываемого ею, и полюсного наконечника;
- определяющий размер ядра электромагнита – диаметр сердечника ЭМ –  $d_c$ ;
- расчет ядра электромагнита – определение размера ядра и обмоточных данных катушки.
- Предлагаемая методика предполагает три этапа расчета ЭМ.

1. Предварительный расчет с использованием упрощенных соотношений, предусматривающий в первом приближении определение размеров магнитопровода, катушки, сечения и числа витков обмотки.

2. Разработка по данным предварительного расчета конструкции ЭМ с применением основанных на опыте проектирования и физическом моделировании ряда конструктивных коэффициентов и параметров.

3. Проектный расчет ЭМ, предусматривающий окончательное уточнение полученных в предварительном расчете параметров, геометрических размеров, обмоточных данных, оценка соответствия температурных и энергетических параметров существующим нормам.

Расчету электромагнита должен предшествовать анализ кинематической схемы механизма, с которым электромагнит сочленен, с целью определения результирующих характеристик противодействующих сил или моментов, которые необходимо преодолеть при движении якоря.

В результате должен быть установлен зазор по ходу якоря, при котором электромагниту приходится развивать наибольшую работоспособность для преодоления противодействующей силы ( $F_n$ ). Такой зазор в дальнейшем принято называть критическим ( $\delta_o$ ), а соответствующую электромагнитную силу критической силой ( $F_o$ ). Для обеспечения надежной работы критическая сила должна несколько превышать соответствующую этому зазору противодействующую силу

$$F_o = K \cdot F_n,$$

где  $K = 1,2 \div 1,5$  – коэффициент запаса, принимаемый для самых неблагоприятных условий эксплуатации (понижение напряжения при нагретой катушке).

Значения критической силы  $F_0$  (кг) и критического зазора  $\delta_0$  (см) являются основными исходными данными расчета ЭМ.

Кроме того, необходимо знать условия работы ЭМ (продолжительный, кратковременный), род тока, напряжение  $U$ , частоту  $f$ , тип якоря ЭМ (прямоходовой, поворотный, вращающийся), исполнение катушки (токовые, напряжения, намотанные на каркас, трубу, сердечник, бескаркасные и так далее).

Заданный тип электромагнита и исходные данные для его расчета для предписанного студенту варианта приведены в приложении 1. Для студентов безотрывных форм обучения номер варианта соответствует сумме двух последних цифр учебного шифра. Эскизы предлагаемых к разработке электромагнитов приведены на рис. 2.1.

При этом предполагается, что электромагниты открытого исполнения, для продолжительного режима работы. Катушка наматывается на латунную трубу толщиной 1 мм, на торцах обмотки имеется по одной изоляционной шайбе из текстолита толщиной 2 мм. Для устранения залипания якоря под полюсными наконечниками магнитопровода уложены немагнитные металлические прокладки толщиной 0,3 мм.

В процессе разработки проекта необходимо выполнить следующий объем расчетов:

1. определить основные размеры электромагнита;
2. рассчитать обмоточные данные катушки;
3. разработать чертеж электромагнита;
4. определить максимальную температуру по сечению катушки ЭМ;
5. оценить потребляемую ЭМ мощность в рабочем режиме, расход активных обмоточных материалов, вес электромагнита, стоимость использованных материалов.

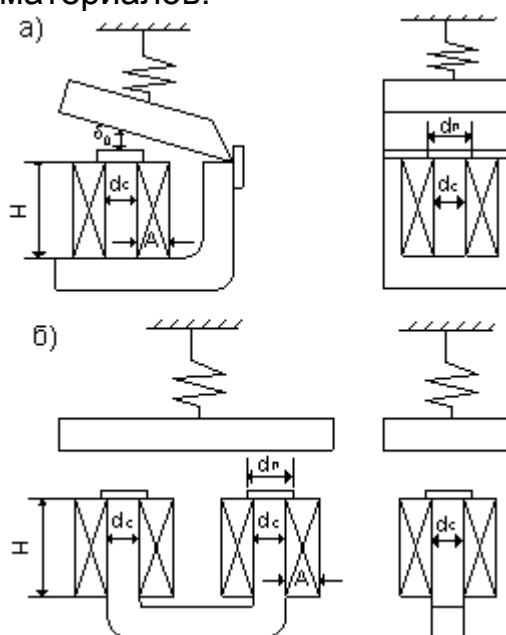


Рис. 2.1. Эскизы электромагнитов: а) поворотного; б) прямоходового

### 3. Предварительный расчет ядра электромагнита

3.1. Для проведения расчета необходимо задаться некоторыми параметрами и безразмерными коэффициентами предварительного расчета:

а) принять исполнение катушки, класс ее изоляции и в соответствии с этим допустимое превышение температуры катушки относительно окружающей среды (приложение 2)

$$\theta_g = \theta \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) при нормированной температуре окружающей среды  $\nu_{oc} = 35^\circ$  допустимая температура катушки

$$\nu_g = \theta_g + 35^\circ.$$

3.2. В соответствии с принятыми значениями  $\theta_g$  и  $\nu_g$  находим:

а) коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности катушки [4], Вт/град·см<sup>2</sup>

$$h = h_g = 9,3 \cdot 10^{-4} (1 + 0,0059 \cdot \theta_g);$$

б) удельное сопротивление провода нагретой катушки

$$\rho = \rho_g = \rho_o (1 + \alpha_o \cdot \nu_g)$$

где  $\rho_o = 0,0162 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – удельное сопротивление медного провода при  $0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_o = 0,00393 \text{ 1/град.}$  – температурный коэффициент;

в) коэффициент теплообмена с внутренней поверхности катушки:  $h_b = \alpha h$ , где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий теплообмен между и внутренней поверхностью катушки и сердечником и зависящий от исполнения катушки ( $\alpha = 0,9$  – для бескаркасной, банжированной;  $\alpha = 1,7$  - для катушки, намотанной на трубу;  $\alpha = 2,7$  - для катушки, намотанной на сердечник;  $\alpha = 0$  - для катушек, имеющих изоляционный каркас, плохо проводящий тепло).

3.3. Используя накопленный опыт проектирования, принять значения безразмерных конструктивных коэффициентов с учетом наличия на сердечнике полюсного наконечника по таблице 3.1, рис. 2.1, где

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{A}}{d_c} = \quad ; \quad \tau = \frac{d_n}{d_c} = \quad ; \quad \beta = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{n}} = \quad ; \quad \mathbf{m} = \beta \cdot \mathbf{n}.$$



## Рекомендуемые значения конструктивных коэффициентов

Исполнение ЭМ	Постоянный ток		Переменный ток
	без полюсного наконечника	С полюсным наконечником	
п	0,4 - 0,6	0,7 – 0,9	0,5 – 0,8
β	2,0 - 8,0	4,0 – 7,0	2,0 – 4,0
τ	1,0	1,6 – 2,0	0,8 – 2,0

3.4. Принять предварительное заполнение окна катушки металлом провода

$$f_3 = \frac{S_M \cdot W}{H \cdot A},$$

где  $S_M$  – сечение провода обмотки, см<sup>2</sup>;  $W$  – число витков обмотки;  $H$  и  $A$  – высота и ширина катушки (рис. 2.1);  $f_3=0,4 \div 0,6$  в зависимости от марки провода и способа укладки проводов. Впоследствии требует уточнения.

Задаемся возможным снижением напряжения в сети  $X=0,85$ .

Задаемся возможным снижением магнитного потенциала в стали и в нерабочих зазорах (снижение МДС). В рационально построенных конструкциях падение МДС в стали магнитопровода составляет 10 ÷ 20%, а в нерабочих воздушных зазорах 5 ÷ 10% от величины полной МДС катушки ( $I \cdot W$ )

$$\varphi = \frac{(I \cdot W_o)}{(I \cdot W)} = 0,85 \div 0,7,$$

где  $I \cdot W_o$  – МДС, приходящаяся на основной рабочий зазор.

### 3.4. Расчет ядра электромагнита:

а) приближенное значение индукции в воздушном зазоре можно получить [1], используя безразмерные конструктивные коэффициенты в виде

$$B_0 = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\tau / \sqrt[3]{C_1}} \sqrt[10]{\frac{(2F_0)^3}{\delta_0^4}} \quad \text{- для прямоходового ЭМ,}$$

$$B_0 = \frac{4,8 \cdot 10^{-5}}{\tau / \sqrt[3]{C_1}} \sqrt[10]{\frac{F_0^3}{\delta_0^4}} \quad \text{- для поворотного ЭМ,}$$

$$\text{где } C_1 = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot \rho_g (1+n)}{\varphi^2 \cdot X^2 \cdot f_3 \cdot \tau^2 \cdot m^2 \cdot n(1+2n+\alpha) h \cdot \theta_g} \quad (3.1)$$

Исходя из опыта проектирования, значение индукции  $B_0$ , как правило, не должно превосходить  $B_0 \leq (0,6 \div 0,8) \cdot 10^{-4}$  Вб/см<sup>2</sup>;

б) в связи с наличием полюсного наконечника происходит “выпучивание” магнитного потока в зазоре (силовые линии поля исходят не только из горизонтальной плоскости полюсного наконечника, но и из его боковых сторон). Значение коэффициента “выпучивания”, учитывающего это явление для ЭМ данного типа, определить по формуле

$$\varepsilon^2 = 1 + \frac{2,08}{\tau \cdot \chi} \quad (3.2)$$

где  $\chi = d_c / \delta_0$  – некоторый текущий параметр.

Определяющий размер ядра электромагнитного элемента  $d_c$  (диаметр сердечника) можно найти из зависимости [1]

$$\frac{F_0}{\delta_0^3} = \frac{2\varepsilon^2 \cdot \chi^5}{C_1} \quad (3.3)$$

Так как совместное решение (3.2) и (3.3) достаточно громоздко, необходимо использовать графоаналитический метод, для чего произвести расчет и построение графика зависимости

$$\frac{F_o}{\delta_o^3} = f(\chi) \quad (3.4)$$

задаваясь произвольными значениями  $\chi$ .

Результаты расчета свести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

К расчету зависимости (3.4)

$\chi$	$\chi^2$	$\chi^3$	$\chi^5$	$\varepsilon^2$	$F_o/\delta_o^3$	Примечание
1						
2						
И т.д.						

По расчетным данным построить зависимость (3.4) и на полученной кривой, интерполируя, найти значение  $\chi$ , соответствующее заданной величине  $F_o/\delta_o^3$ , что позволяет получить определяющий размер ядра электромагнита  $d_c$ ,

$$\text{см: } d_c = \delta_o \cdot \chi$$

### 3.5. Определение основных параметров ядра электромагнита

#### 1. Габариты ядра ЭМ:

- ширина катушки  $A = n \cdot d_c$ ;
- высота катушки  $H = m \cdot d_c$ ;
- диаметр полюсного наконечника  $d_n = \tau \cdot d_c$ .

#### 2. Предварительные параметры катушки [1,5] - необходимая МДС, Ав

$$IW = \frac{9 \cdot 10^3}{\varphi X \tau} d_c \cdot \sqrt{d_c / C_1} \quad \text{- для прямоходового ЭМ (прх);} \quad (3.5)$$

$$IW = \frac{4,5 \cdot 10^3}{\varphi X \tau} d_c \cdot \sqrt{d_c / C_1} \quad \text{- для поворотного ЭМ (пов);} \quad (3.6)$$

- сечение провода обмотки (расчетное),  $\text{см}^2$ :

$$S_M = \frac{2,82 \rho_g (1+n)}{U \varphi X \tau} d_c^2 \sqrt{d_c / C_1} \text{ (прх);} \quad (3.7)$$

$$S_M = \frac{1,41 \rho_g (1+n)}{U \varphi X \tau} d_c^2 \sqrt{d_c / C_1} \text{ (пов);} \quad (3.8)$$

диаметр провода (расчетный), см:  $d = \sqrt{4S_M / \pi}$ .

Выбирают ближайший размер провода марки ПЭЛ (приложение 4), а именно: диаметр по меди (фактический), диаметр по изоляции (фактический), сечение по меди  $S'_M$  (фактическое);

- число витков

$$W = \frac{2f_3 AH}{S'_M} \text{ (для прх.) на две катушки} \quad (3.9)$$

$$W = \frac{f_3 AH}{S'_M} \text{ (для пов.)} \quad (3.10)$$

Результаты предварительного расчета следует свести в таблицу 3.3

Таблица 3.3

Результаты предварительного расчета проектируемого электромагнита (тип )

Основные расчетные параметры	Ед.изм.	Значения
Критическая сила $F_o$	кг	
Критический зазор $\delta_o$	см	
Определяющий размер ядра $d_c$	см	
Индукция в зазоре $B_o$	Вб/см <sup>2</sup>	
n		

$\beta$		
$\tau$		
$m$		
Магнитодвижущая сила (МДС)	Ав	
Сечение провода	мм <sup>2</sup>	
Число витков	В	

#### 4. Разработка конструкции электромагнита

Разработка конструкции ЭМ производится по данным предварительного расчета в соответствии с требованиями технологичности конструкции, надежности ее эксплуатации. В процессе эскизной проработки проекта уточняются геометрические размеры магнитопровода и катушки с учетом округления до конструктивных размеров и использования существующих сортов материалов.

4.1. Исходными данными проектного расчета являются результаты предварительного расчета ЭМ:

- критическая сила  $F=F_0$  (кг) и критический зазор  $\delta_0$ ;
- полученные в предварительном расчете определяющий размер ЭМ  $d_c$ , см; сечение металла провода  $S_m'$ , см и МДС (катушек)  $IW$ , Ав;
- принятые значения безразмерных коэффициентов  $m$ ,  $n$ ,  $\tau$ ,  $\beta$ , определяющие габариты электромагнита. Скорректированные в проектном расчете размеры ЭМ будем снабжать индексом штрих (');  $d_c'$ ;  $A'$  и т.д. Один из вариантов рабочего эскиза электромагнита приведен на рис. 4.1.

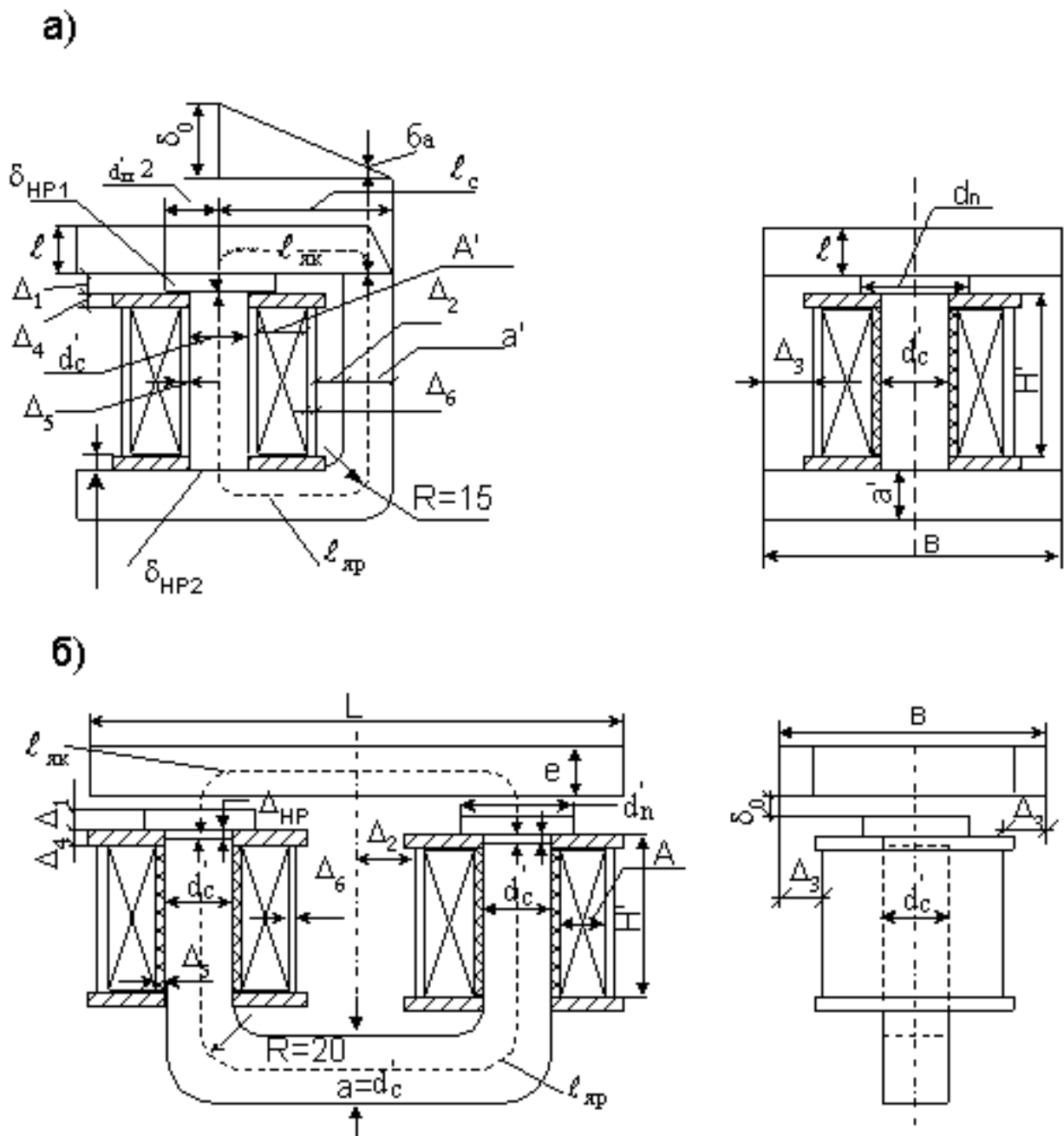


Рис. 4.1 Рабочий эскиз электромагнита: а) с поворотным якорем; б) с прямоходовым якорем

4.2. Учитывая имеющийся опыт проектирования электромагнитных устройств, можно рекомендовать следующий порядок дальнейшего расчета:

- уточнить размеры  $d_c$ , исходя из соображения округления полученного ранее размера до конструктивного размера или имеющегося сортамента материала  $d_c'$ , см;
- принять конструктивно размеры высоты полюсного наконечника  $\Delta_1$  и расстояние от скобы магнитопровода до катушки (или между двумя катушками)  $\Delta_2$ , которое определяется удобством замены катушки, но не менее  $5 \div 10$  мм,  $\Delta_1 = \text{см}$ ,  $\Delta_2 = \text{см}$ ;

- уточнить размеры катушки, см  $H' = m \cdot d_c'$ , высоту катушки  $H_k = H' + 2\Delta_4$ , где  $\Delta_4 - 1,5 \div 2,5$  мм, ширина намотки, см  $A' = n \cdot d_c'$ , ширину катушки, см  $A_k' = A' + \Delta_5 + \Delta_6$ .

$\Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$  - принимать конструктивно в соответствии с выбором способа изоляции и толщиной корпуса катушки (1,5 ÷ 2,5 мм);

- определить диаметр полюсного наконечника, см  $d_n' = \tau \cdot d_c'$ . Наружный и внутренний диаметр катушки, см  $D_n' = d_c' + 2A_k'$ ,  $D_b' = d_c'$ .

4.3. По полученным в п. 4.2 размерам и исполнению катушки определить ее поверхность ( $\Pi$ ) охлаждения с учетом возможного различия теплоотдачи на ее участках ( $\Pi_{BH}, \Pi_{BV}, \Pi_T$ ):

- боковая наружная поверхность, см<sup>2</sup>  $\Pi_{BH} = \pi \cdot D_n' \cdot H'$  ;

- боковая внутренняя поверхность, см<sup>2</sup>  $\Pi_{BV} = \pi \cdot D_b' \cdot H'$  ;

- торцевая поверхность, см<sup>2</sup>  $\Pi_T = 2(D_n' - D_b') \ell_B$ ,

где  $\ell_B = \pi \frac{(D_n' + D_b')}{2}$  - длина среднего витка.

4.4. Определить конструктивные параметры магнитопровода.

Ширина магнитопровода “в” (якоря) не должна значительно превышать наружный диаметр катушек:  $v = D_n' + 2\Delta_3$ , где  $\Delta_3 = 2 \div 5$  мм.

Сечение скобы магнитопровода  $S_a$  (поворотный ЭМ) во избежания насыщения не должно быть меньше сечения сердечника, см<sup>2</sup>:

$$S_a \geq S_c = \frac{\pi (d_c')^2}{4}$$

Толщина скобы магнитопровода ( $a$ )  $a \geq \frac{S_a}{v}$ , см, но не меньше 4 мм.

Сечение якоря магнитопровода может быть принято несколько меньше эквивалентного сечения основного зазора,  $S_{\text{ЯК}} = (0,7 \div 1,0) S_{\text{ПЭ}}'$ , где

$$S_{\text{ПЭ}}' = \frac{\pi (d_c')^2 \cdot \tau^2}{4} - \text{эквивалентное сечение полюсного наконечника.}$$

Толщина якоря  $e$  определяется его сечением и шириной, см

$$e = \frac{S_{\text{ЯК}}}{B},$$

но не меньше  $4 \div 6$  мм по соображению его механической прочности.

Высота сердечника  $H_c'$  определяется высотой катушки  $H_k'$ . При отсутствии полюсного наконечника выступающий конец сердечника принимают равным  $\Delta = 2 \div 5$  мм.

4.5. По принятым размерам магнитопровода определяют среднюю длину силовых линий якоря  $\ell_{\text{ЯК}}$  и ярма  $\ell_{\text{ЯР}}$  (см. рис. 4.1):  $\ell_{\text{ЯК}} = \text{см}$ ,  $\ell_{\text{ЯР}} = \text{см}$ .

Уточнить размеры зазоров в местах неразрывных деталей отдельных участков магнитопровода, то есть нерабочих зазоров в месте сочленения полюсного наконечника и сердечника ( $\delta_{\text{нр1}}$ ,  $\delta_{\text{нр2}}$ ), сердечника и скобы. Указанные зазоры определяют, исходя из неплотного прилегания поверхностей стали ( $2 \times 0,005$  см), наличия антикоррозионных покрытий ( $2 \times 0,015$  см), немагнитных прокладок (0,03 см), и принимают в пределах  $0,05 \div 0,015$  см.

В поворотных системах найти средний зазор в области расположения точки вращения якоря при критической величине основного зазора  $\delta_o$  (см. рис. 4.1):

$$\delta_a = \frac{a' \cdot \delta_o}{2\ell_c}, \text{ где } \ell_c = a' + \Delta_2 + A' + 0,5d_c'. \text{ Для прямоходовых систем } \delta_a = \delta_o.$$

Результаты расчета конструктивных параметров, проектируемого ЭМ, следует свести в таблицу 4.1.

4.6. По принятым в проектном расчете размерам разрабатываемого ЭМ необходимо выполнить рабочий чертеж в масштабе 1:1 формата А3 с приложением спецификации деталей ЭМ. Номера позиций составных частей изделия указываются на полках линий выносок чертежа.



Результаты расчета конструктивных параметров проектируемого  
электромагнита (тип )

Основные расчетные параметры	Ед.изм.	Примечания
Критическая сила $F=F_o(2F_o)$	кг	
Критический зазор $\delta_o$	см	
Определяющий размер ядра ЭМ $d_c$	см	
Высота обмотки $H'$	см	
Высота катушки $H_k'$	см	
Ширина катушки $A_k'$	см	
Ширина намотки $A'$	см	
Наружный диаметр катушки $D_n'$	см	
Внутренний диаметр катушки $D_b'$	см	
Боковая наружная поверхность $P_{БН}$	см <sup>2</sup>	
Боковая внутренняя поверхность $P_{БВ}$	см <sup>2</sup>	
Ширина скобы магнитопровода $b$	см	
Толщина скобы $a'$	см	
Толщина якоря $e$	см	
Сечение скобы $S_a$	см <sup>2</sup>	
Сечение якоря $S_{як}$	см <sup>2</sup>	
И т.д.		

## 5. Проектный расчет основных параметров электромагнита

5.1. По значению критической силы  $F_o$ , величине зазора  $\delta_o$  и принятому размеру сердечника  $d_c'$  определить уточненные значения индукции в зазоре Вб/см<sup>2</sup>:

$$B'_0 = 0,396 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{F_0}}{\tau' \varepsilon' d'_c} \text{ - для прямоходового ЭМ,}$$

$$B'_0 = 0,56 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{F_0}}{\tau' \varepsilon' d'_c} \text{ - для поворотного ЭМ,}$$

где  $\varepsilon'$  – уточненное значение коэффициента выпучивания, определенного для критического зазора

$$\varepsilon' = \sqrt{1 + 2,08 / \tau' \chi'}, \text{ где } \chi' = d'_c / \delta_0.$$

Полученные результаты сравнить с данными предварительного расчета и сделать вывод.

5.2. Для дальнейших расчетов нужно знать, какая часть магнитного потока магнитопровода приходится на магнитный поток рассеивания. Рассеивающаяся в окружающую среду часть магнитного потока оценивается с помощью коэффициента рассеивания ( $\beta$ ) при критическом положении якоря. Для этого предварительно нужно определить проводимость основного воздушного зазора, Гн

$$G_0 = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot (d'_0)^2}{4\delta_0} = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot (\varepsilon' \cdot \tau \cdot d'_c)^2}{4\delta_0}, \quad (5.1)$$

где  $d'_0 = \varepsilon' \cdot \tau \cdot d'_c$  - фиктивный диаметр рабочего воздушного зазора с учетом полюсного наконечника и выпучивания.

Далее следует определить проводимость нерабочих воздушных зазоров, Гн

$$G_{нр} = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot (d'_c)^2}{4\Delta_{нр}}, \quad (5.2)$$

где величина нерабочего зазора ( $\Delta_{нр}$ ) определяется по эскизу ЭМ и состоит из немагнитной прокладки (0,03 см), неплотностей прилегания за счет неровностей обработки поверхности стали (0,005 см на сочленение элементов магнитопровода) и наличия антикоррозийного покрытия (0,0015 см). Следует учитывать два нерабочих зазора.

При определении общей проводимости рабочих и нерабочих зазоров для прямоходовых ЭМ пользуются соотношением (с учетом двух последовательно работающих рабочих зазоров), Гн

$$G = \frac{0,5 G_0 \cdot G_{нр}}{0,5 G_0 + G_{нр}} \quad (5.3)$$

Для поворотных ЭМ необходимо учесть дополнительно проводимость среднего зазора в области расположения точки вращения якоря  $\delta_a$ , Гн

$$G_a = \frac{\mu_0 \cdot S_a}{\delta_a} = \frac{\mu_0 \cdot B' \cdot 2\ell_c}{\delta_0} = \frac{2\mu_0 \cdot B' \cdot \ell_c}{\delta_0} \quad (5.4)$$

Тогда общая проводимость  $G$  (рис. 4.1.) по всем трем видам воздушных зазоров определится из соотношения

$$G = \frac{G_0 \cdot G_{нр} \cdot G_a}{G_0 \cdot G_{нр} + G_0 \cdot G_a + G_{нр} \cdot G_a} \quad (5.5)$$

Приведенная по магнитному потоку проводимость находится из соотношения

$$G_y = \frac{g \cdot H_k'}{2}, \quad (5.6)$$

где  $H_k'$  - полная высота катушки;  $g$  - удельная проводимость утечки.

Для прямоходового ЭМ с двумя сердечниками

$$g = \frac{\pi \cdot \mu_0}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\ell^2 - (d_c')^2} / d_c' \right]} \quad (5.7)$$

Для поворотного ЭМ

$$g = \frac{2\pi \cdot \mu_0}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\ell^2 - 0,5(d_c')^2} / 0,5 d_c' \right]} \quad (5.8)$$

В этих выражениях  $\ell$  - расстояние между осями катушки или между осью катушки и осью ярма.

Теперь можно определить значения коэффициента рассеяния для критического положения якоря

$$\sigma = \frac{G + G_y}{G} \quad (5.9)$$

5.3. Определить значение индукции в стали сердечника, Вб/см<sup>2</sup>

$$B'_c = B'_0 \cdot \sigma \left( \varepsilon' \tau' \right) \quad (5.10)$$

Полученное значение индукции не должно превышать предела насыщения используемой для магнитопровода стали (приложение 3).

Уточнить значение индукции в стали якоря

$$B'_{як} = B'_0 \frac{S_0}{S_{як}}, \quad (5.11)$$

где  $S_0 = \pi \left( \varepsilon' \tau' d_c \right)^2 / 4$  - эквивалентное сечение основного зазора.

5.4. Определить магнитодвижущую силу катушки ЭМ, необходимую для проведения потока в рабочих зазорах

$$(I \cdot W)'_c = N \cdot \delta_0 \frac{B'_0}{\mu_0}, \quad (5.12)$$

где N – число рабочих воздушных зазоров; для проведения потока в нерабочих зазорах

$$(I \cdot W)'_{нр} = \Delta_{нр} \frac{B'_0}{\mu_0} \quad (5.13)$$

Необходимая МДС для проведения потока в стали вычисляется по найденным значениям индукции  $B'_c$  (5.1) и  $B'_{як}$  (5.12) и определенной по эскизу ЭМ длине участка сердечника  $\ell_c$  и якоря  $\ell_{як}$  (с учетом наличия полюсных наконечников, рис. 4.1). При этом следует использовать кривые намагничивания принятого материала магнитопровода (приложение 3) для нахождения напряженности поля, соответствующей индукции в металле

$$(IW)'_{ст} = H_c \ell_{як} + H_{як} \ell_{як} \quad (5.14)$$

Общее значение МДС катушки

$$(IW)' = (IW)'_o + (IW)'_{np} + (IW)'_{ст} \quad (5.15)$$

Целесообразно сравнить полученную в результате проектного расчета МДС  $(IW)'$  (5.15) с полученной в предварительном расчете  $(IW)$  и сделать вывод.

## 6. Определение проектных параметров катушки электромагнита

Сравнение МДС проектного и предварительного расчета позволяет уточнить сечение и число витков катушки ЭМ.

6.1. Определить общее сечение меди (провода) обмотки

$$S'_M = S_M \frac{(IW)'}{(IW)} \quad (6.1)$$

Диаметр провода обмотки

$$d' = \sqrt{4S'_M / \pi} \quad (6.2)$$

После чего следует подобрать ближайший по ГОСТ (приложение 4) диаметр провода без изоляции  $d'$ ; определить диаметр провода с изоляцией  $d'_1$  и сечение провода  $S'_{пр}$ .

Определить коэффициент заполнения окна катушки  $f_{зп}$  для идеальной шахматной укладки проводов  $f_{ш}$

$$f_{зп} = f_{ш} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{d}{d_1} \right)^2 \quad (6.3)$$

Учитывая неравномерную укладку проводов при намотке, выполненной на автомате ( $K_y=0,9$ ), необходимо найти реальный коэффициент заполнения  $f'_3$ :  $f'_3 = K_y (f_{зп})$ .

6.2. Уточнить проектное число витков

$$W' = \frac{f'_3 \cdot A' \cdot H'}{S'_M} \quad \text{- при одной катушке,} \quad (6.4)$$

$$W'_{\text{общ}} = \frac{2f_3' \cdot A' \cdot H'}{S_M} \quad \text{ - при наличии двух катушек .} \quad (6.5)$$

6.3. Определить сопротивление одной катушки, отнесенное к 0°C

$$R_o' = \frac{10^{-4} \cdot \rho_o \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} W'}{S_M} \quad , \quad (6.6)$$

где  $D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{в}}}{2}$  - средний диаметр катушки  $\rho_o = 0,0162$  Ом мм<sup>2</sup>/м - удельное сопротивление меди при 0°C,  $W'$  - число витков одной катушки.

Потребляемая мощность на одну катушку

$$P_o = \frac{U^2}{R_o'} \quad \text{или} \quad P_o = \frac{U^2}{4R_o'} \quad \text{при наличии двух катушек.} \quad (6.7)$$

Удельные потери в единице объема катушки, см  $q_o = \frac{P_o}{V}$ , Вт/см<sup>2</sup>, где  $V = \pi D_{\text{ср}} A' H'$  - объем обмотки, см<sup>3</sup>.

## 7. Расчет теплового режима обмотки

7.1. Тепловой режим обмотки зависит от значительного числа конструктивных факторов и физических свойств материалов, использованных в обмотке ЭМ: способа намотки, толщины изоляции провода  $\delta$  и его материала, наличия изоляционных прокладок  $\Delta$ , размеров заполненного воздухом (лаком) пространства обмотки  $i$  и др. Расположение этих элементов в обмотке можно иллюстрировать эквивалентной картиной, приведенной на рис. 7.1.

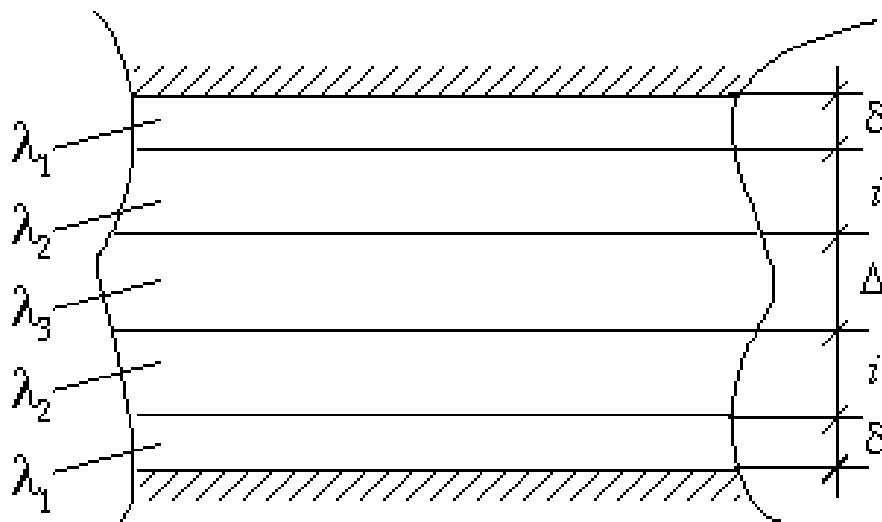


Рис.7.1. Эквивалентная схема расположения элементов изоляции в обмотке

Для каждого приведенного элемента обмотки (рис.7.1) характерно определенное значение теплоемкости  $\lambda$ , полученное экспериментальным путем и приведенное в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Рекомендуемые значения коэффициентов теплопроводности

Исполнение	Коэффициент теплопроводности, Вт/см град $\cdot 10^{-3}$		
	без пропитки	пропитка лаком	компаундировка
$\lambda_1$	(0,69 - 0,71)	1,15 - 1,25	1,34
$\lambda_2$	(0,25 - 0,3)	1,4 - 2,2	1,4 - 1,6
$\lambda_3$	(0,5 - 0,8)	1,25 - 1,3	1,4

Приведенное значение коэффициента теплопроводности для изоляции всей катушки  $\lambda_H$  определить по [1], Вт/град  $\cdot$  см

$$\lambda_H = \frac{2\delta + 2i + \Delta}{2\delta/\lambda_1 + 2i/\lambda_2 + \Delta/\lambda_3}, \quad (7.1)$$

где  $2\delta = d_1 - d$  – толщина изоляции провода;  $\Delta$  - толщина прокладки;  $2i$  – эквивалентная толщина участка обмотки, заполненного воздухом или лаком (компаундом), которая определяется способом намотки катушки (рядовая, шахматная) составляет величину  $0,85 \text{? } 0,95 \text{? } 10^{-3}$  см.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности для всей катушки определяется как  $\lambda = K_3 \lambda_H$ , где  $K_3$  некоторый экспериментально определенный, корректирующий коэффициент, характеризующий технологию выполнения обмотки, определяемый по графику зависимости  $K_3 = f(f_3)$ , приведенному на рис. 7.2.

7.2. Далее необходимо произвести расчет температурного режима обмотки (катушки).

Определяющим в работе материала катушки является максимальная температура нагрева ее элементов, так как от ее значения зависит срок службы всех изоляционных материалов и изменение физических свойств металла обмотки.

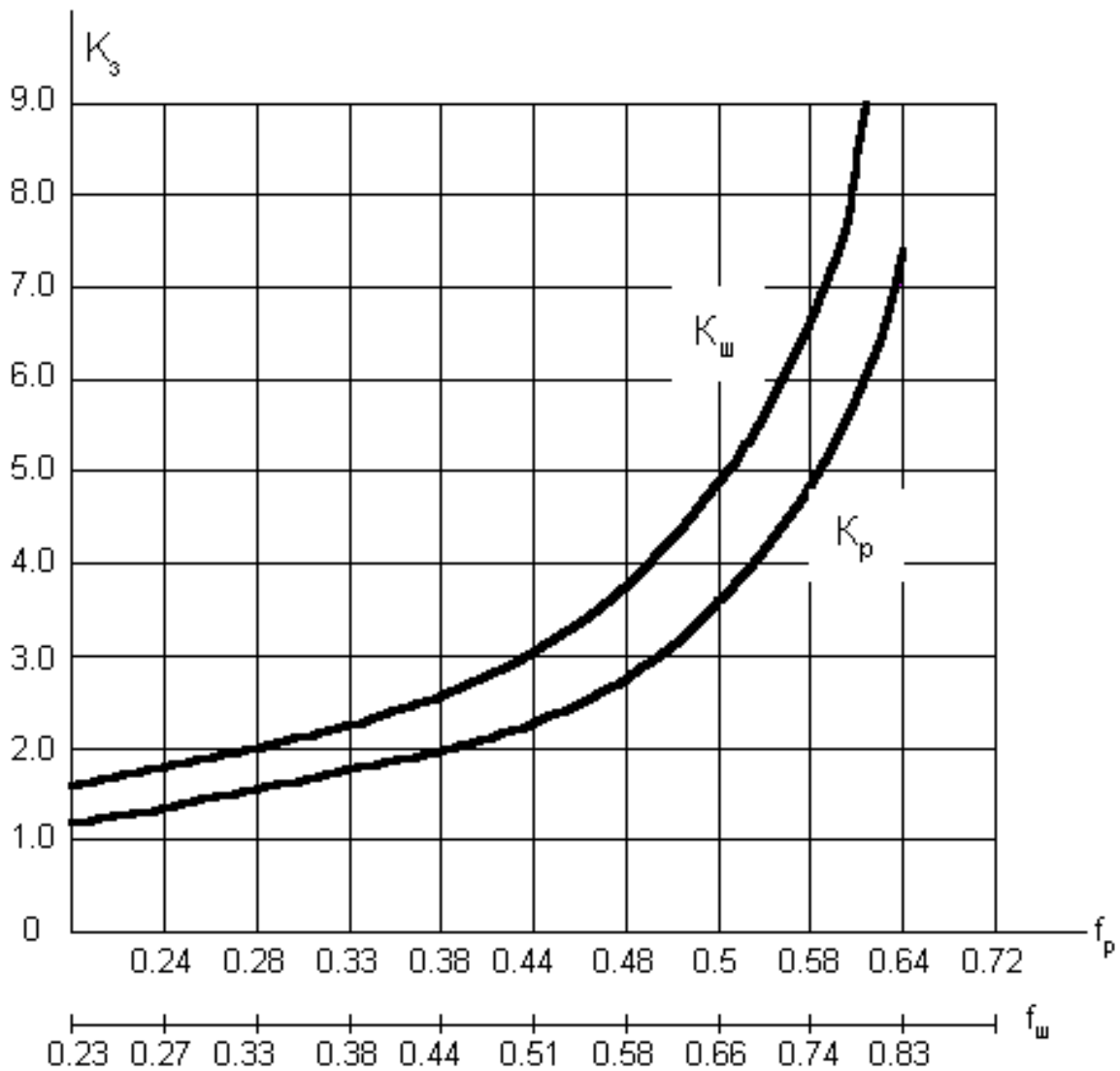


Рис. 7.2. График зависимости корректирующего коэффициента  $K_3=f(f_3)$

Определение максимальной температуры и температурного поля внутри катушки при реальных условиях ее нагрева в аналитической форме достаточно сложно [1,2] и практически неприемлемо для инженерных расчетов. Поэтому используются приближенные методы с учетом привлечения ряда экспериментально полученных зависимостей. В этом случае среднее  $(\theta_{\text{ср}})$  и максимальное  $(\theta_{\text{м}})$  превышение температуры внутренних частей обмотки определяют по отношению к температуре ее поверхности  $(\nu_{\text{п}})$ , предполагая в первом приближении равномерное распределение источников нагрева по сечению обмотки. Используя полученную для ЭМ постоянного тока [4] эмперическую приближенную формулу, температуру перегрева наружной поверхности катушки относительно окружающей среды  $(\nu_{\text{ср}} = 35^\circ)$  можно определить как

$$\theta_{\text{п}} = 84,5 \left[ \sqrt{1 + 25,4(P_0/S_{\text{ох}})} - 1 \right] \quad (7.2)$$



где  $P_0$  – мощность, потребляемая катушкой при сопротивлении проводов

обмотки при температуре  $0^\circ\text{C}$  (6.7);  $S_{\text{ох}} = \pi H' (D_H' + \alpha D_B')$  – поверхность охлаждения через наружную и внутреннюю боковые поверхности. Тепловым потоком через торцевые поверхности можно пренебречь из-за наличия каркаса по торцам (рис. 4.1);  $\alpha = 1,7$  коэффициент, учитывающий рост теплоотдачи с внутренней поверхности катушки (см. пункт 3.2).

Тогда температура поверхности катушки  $\nu_{\text{п}} = \theta_{\text{п}} + \nu_{\text{ср}}$ . Полученное значение температура поверхности  $\nu_{\text{п}}$  следует сравнить с допустимой  $[\nu]$  для принятого типа изоляции (Прилож. 2).

С достаточной силой точности [1] можно считать, что средняя температура тела для катушки на  $1,5 \div 3^\circ\text{C}$  будет превышать температуру боковой ее

поверхности  $\nu_{\text{ср}} = \nu_{\text{п}} + (1,5 \div 3^\circ\text{C})$ .

Теперь можно найти сопротивление провода катушки при этой температуре, Ом

$$R_{\text{ср}} = R_0 (1 + \alpha_0 \cdot \nu_{\text{ср}}) \quad (7.3)$$

где  $\alpha_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$  – температурный коэффициент металла (меди).

Потребляемый нагретой катушкой ток

$$I = \frac{U}{R_{\text{ср}}} \left( I = \frac{U}{2R_{\text{ср}}} \right) \text{ - для двух катушек.} \quad (7.4)$$

7.3. Общую МДС электромагнита (AB) при температуре  $\nu_{\text{ср}}$  найти из

$$(IW') = W'_{\text{общ}} \cdot I \cdot AB \quad (7.5)$$

Результат определения  $(IW')$  можно сравнить с (5.15) и сделать выводы. При этом  $(IW') \geq (IW)'$ , допустим отключение  $5 \div 10\%$ . Далее определить мощность, потребную для работы электромагнита в нагретом состоянии

$$P = U \cdot I \quad (7.6)$$

На этом проектный расчет параметров ЭМ заканчивается.

## 8. Определение стоимостных показателей электромагнита

В данном разделе проекта предлагается определить себестоимость разрабатываемого изделия. Себестоимость определяется по основной заработной плате производственных рабочих ( $Z_o$ ), затратам на материалы и покупные изделия. Основную заработанную плату определить по трудоемкости изготовления аналогичного изделия на действующих предприятиях, которая тарифицируется по третьему разряду (часовая тарифная ставка в ценах 1989 года составляет 0,539 р.). Тогда заработная плата основных производственных рабочих определится как

$$Z_o = 1,15 t_{\text{изд}} \cdot e ,$$

где 1,15 – коэффициент, учитывающий премии;  $t_{\text{изд}}$  – трудоемкость изготовления одного изделия, е – часовая тарифная ставка;  $t_{\text{изд}} \geq 1,3 \div 1,5$  нормочаса.

Результаты расчета затрат на основные материалы следует свести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

### Расчет затрат на основные материалы

Наименование	Вес, кг	Цена 1кг, р	Стоимость, р	Примечание
Сталь конструкционная марки Э		8÷9 руб/кг		
Провод обмоточный		23-25 руб/кг		
Прочие материалы				
Всего				

Вес стали магнитопровода, кг:  $Q_c = \gamma_c \cdot V_c$ , где  $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup> – удельный вес стали;  $V_c$  – объем стали магнитопровода, см<sup>3</sup> (находить по рабочему чертежу).

Вес обмоточного провода, кг  $Q_{\text{пр}} = g \cdot L$ , где  $g$  – расчетная масса 1 м провода, кг/м;  $L = \pi D_{\text{ср}} W \cdot 10^{-2}$  – длина обмоточного провода, м;  $q \approx 0,4 \div 0,5$  кг/км.

Стоимость прочих материалов (крепежные, изоляционные) принимать в размере 20? 25% от основных.

Кроме того, при определении себестоимости необходимо учесть дополнительно следующие затраты:

- дополнительная заработанная плата производственных рабочих – 8% от основной зарплаты ( $Z_0$ );
- отчисление на соц. Страхование – 14% от суммы основной и дополнительной заработной платы;
- расходы по эксплуатации и содержанию оборудования – 11,9% от основной заработной платы;
- цеховые расходы – 20% от основной заработной платы;
- общезаводские расходы – 47% от основной зарплаты.

Полученная сумма составляет заводскую себестоимость изделия. Полная себестоимость учитывает дополнительно непроизводственные расходы – 2,5% от заводской себестоимости.

Результаты расчета стоимости электромагнита свести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2

#### Результаты расчета стоимости электромагнита

Вид и наименование затрат	Ед.изм.	Примечания
Вид меди обмоточной $Q_M$	кг	
Стоимость меди обмоточной $C_M$	р.	
Вес стали электромагнита $Q_C$	кг	
Стоимость стали $C_{ст}$	р.	
Затраты на изготовление электромагнита $Z$	р.	
Общая стоимость электромагнита $C$	р.	
Общий вес электромагнита $Q$	кг	

## 9. Выводы по результатам расчета

Основные параметры электромагнита, полученные в результате проектного расчета, следует свести в таблицу 9.1. и сделать выводы по итогам выполненного проекта.

## Результаты проектного расчета электромагнита

Основные параметры	Ед.изм.	Примечания
Рабочее напряжение $U$	В	
Потребляемый ток $I$	А	
Потребляемая мощность $P$	Вт	
Подъемная сила $F$	кг	
Число витков обмотки $W$	ВИТ	
Магнитодвижущая сила $IW$	АВиТ	
Длина провода обмотки $L$	м	
Диаметр провода $d$	мм <sup>2</sup>	
Рабочая температура обмотки $\nu_{\text{ср}}$	°С	
Сопротивление нагретой обмотки $R_{\text{ср}}$	Ом	
Общий вес электромагнита $Q$	кг	
Полная себестоимость электромагнита $C$	р	

## Исходные данные для расчета электромагнита

Варианты Исходных данных	Тип электромагнита	Критический зазор, см	Критическая сила, кг	Напряжение сети пост. тока , В
		$\delta_0$	$F_0$	U
1	Прх	1,0	4,5	220
2	Пов	1,0	4,5	220
3	Прх	1,5	5,0	110
4	Пов	1,5	5,0	110
5	Прх	1,3	6,0	75
6	Пов	1,3	6,0	75
7	Прх	0,8	7,0	45
8	Пов	0,8	7,0	45
9	Прх	1,0	6,0	85
10	Пов	1,0	6,0	85
11	Прх	1,3	5,0	110
12	Пов	1,3	5,0	110
13	Прх	1,5	4,0	220
14	Пов	1,5	4,0	220
15	Прх	0,8	4,5	110
16	Пов	0,8	4,5	110
17	Прх	1,0	5,0	95
18	Пов	1,0	5,0	95
19	Прх	1,3	5,5	48
20	Пов	1,3	5,5	48
21	Прх	1,5	6,5	60
22	Пов	1,5	6,5	60
23	Прх	1,3	7,0	50

## Допустимые температуры нагрева провода обмотки

Характеристика изоляции и технология пропитки	Предельно допустимое значение °С		Допустимое превышение температуры
	температура	превышение $\nu_{oc=35^{\circ}}$	
1	2	3	4
Провод с хлопчатобумажной или шелковой изоляцией (класс У). Катушка не пропитана	90	55	45 - 50
Провод с эмалевой изоляцией, бумажные прокладки Катушка не пропитана	90	55	45 - 50
Провод с х/б изоляцией шелковой или эмалевой, бумажные прокладки (класс А ). Катушка пропитана маслом или лаком	105	70	60 - 65
Провод с эмалевой изоляцией (класс А ). Катушка компаундированная, пропитана нагревостойкими составами	120	85	70 - 75
Провод со стекловолоконистой изоляцией. Катушка пропитана синтетическими смолами (класс В ).	190	95	80 - 85
Провод со стекловолоконистой изоляцией. Катушка пропитана составами повышенной теплостойкости (класс F ).	155	120	100 - 105
Провод со стекловолоконистой изоляцией. Катушка пропитана кремнийорганическими смолами (класс).	180	145	120 - 135

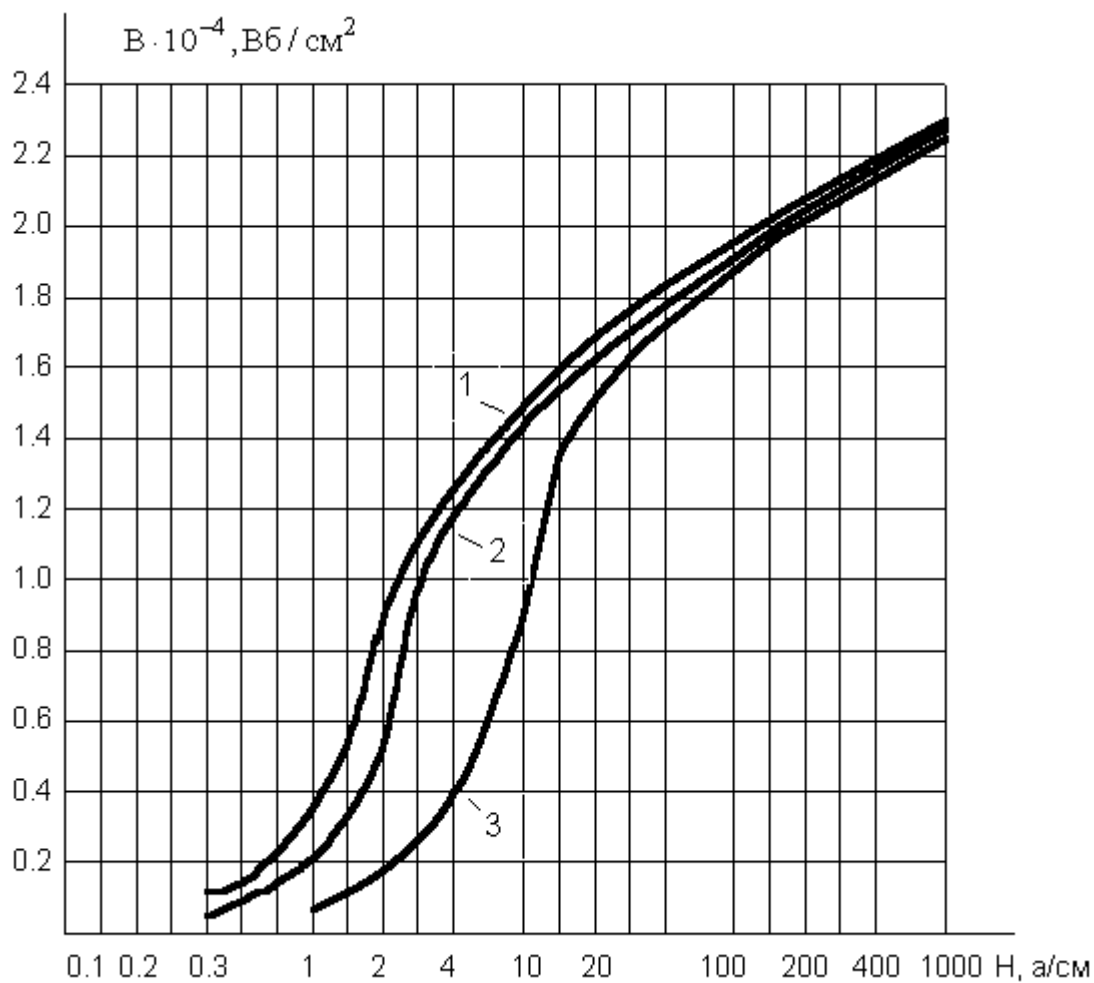


Рис.1. Кривые намагничивания магнитных материалов: 1 - сталь низкоуглеродистая марки Э отожженная; 2 - сталь конструкционная марки Э отожженная; 3 - сталь качественная конструкционная марки 20 отожженная

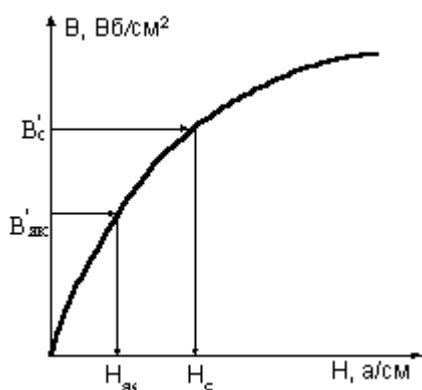


Рис.2. Ключ к определению МДС в стали

Приложение 4  
Таблица 1

Обмоточные провода круглые (по ГОСТ 6324-52)

Диаметр, мм	Сечение мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг	Диаметр, мм	Сечение мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг	Диаметр, мм	Сечение мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	0,00196	0,01746	0,47	0,1735	1,542	1,30	1,327	11,80
0,06	0,00283	0,0252	0,49	0,1886	1,676	1,35	1,431	12,73
0,07	0,00385	0,0342	0,51	0,2043	1,816	1,40	1,539	13,69
0,08	0,00503	0,0447	0,53	0,221	1,961	1,45	1,651	14,68
0,09	0,00636	0,0566	0,55	0,238	2,11	1,50	1,767	15,71
0,10	0,00785	0,0698	0,57	0,255	2,27	1,56	1,91	16,99
0,11	0,00950	0,0845	0,59	0,273	2,43	1,62	2,06	18,32
0,12	0,01131	0,1005	0,62	0,302	2,68	1,68	2,217	19,71
0,13	0,01327	0,1180	0,64	0,322	2,86	1,74	2,38	21,1
0,14	0,01539	0,1368	0,67	0,353	3,13	1,81	2,57	22,9
0,15	0,01767	0,1571	0,69	0,374	3,32	1,88	2,78	24,7
0,16	0,0201	0,1788	0,72	0,407	3,62	1,95	2,99	26,5
0,17	0,0227	0,202	0,74	0,430	3,82	2,02	3,205	28,5
0,18	0,0255	0,226	0,77	0,466	4,14	2,10	3,46	30,8
0,19	0,0284	0,252	0,80	0,503	4,47	2,26	4,01	35,7
0,20	0,0314	0,279	0,83	0,541	4,81	2,44	4,68	41,6
0,21	0,0346	0,308	0,86	0,581	5,16	2,63	5,43	48,3
0,23	0,0415	0,369	0,90	0,636	5,66	2,83	6,29	55,9
0,25	0,0491	0,436	0,93	0,679	6,04	3,05	7,31	65,0
0,27	0,0573	0,509	0,96	0,724	6,43	3,28	8,45	75,1
0,29	0,0661	0,587	1,00	0,785	6,98	3,53	9,79	87,0



## Продолжение прилож. 4 табл. 1

0,31	0,0755	0,671	1,04	0,849	7,55	3,80	11,34	100,8
0,33	0,0855	0,760	1,08	0,916	8,14	4,10	13,20	117,4
0,35	0,0962	0,855	1,12	0,985	8,75	4,50	15,90	141,4
0,38	0,1134	1,008	1,16	1,057	9,40	4,80	18,10	160,9
0,41	0,1320	1,173	1,20	1,131	10,05	5,20	21,2	188,8
0,44	0,1521	1,352	1,25	1,227	10,91			

Толщина изоляции (с двух сторон) для различных марок обмоточных проводов (по ГОСТ 6324-52, 7262-54, 2773-51, 7919-60, 10288-62) на медные провода и ТУ на алюминиевые провода

Марка	Диаметры круглых проводов, мм										
прово-дов	0,05- 0,09	0,1 - 0,19	0,2 - 0,25	0,27 - 0,29	0,31 - 0,35	0,38 - 0,49	0,51 - 0,69	0,72 - 0,96	1 - 1,45	1,5 - 2,1	2,26- 5,2
ПЭЛ	0,015	0,020	0,025	0,04	0,04	0,04- 0,05	0,05	0,06	0,07- 0,08	0,08- 0,10	-
ПЭЛУ	-	0,035	0,04	0,06	0,06	0,06- 0,07	0,07	0,08- 0,09	0,1 - 0,11	0,11 - 0,13	-
ПЭВ-1	0,025	0,010	0,03- 0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,7- 0,8	0,08- 0,1	0,10
ПЭВ-1	0,030	0,03- 0,04	0,04- 0,05	0,05	0,05- 0,06	0,06- 0,07	0,07- 0,08	0,09	0,11	0,11 - 0,13	0,13

## Список литературы

1. Любчик М.А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного токов.-М:Госэнергоиздат, 1959.-223 с.
2. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока.-М: Энергия, 1968. -150 с.
3. Гордон А.В., Сельвинская А.Г. Электромагниты постоянного тока.-М: Энергоиздат, 1972.-446 с.
4. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД “Эскизный проект”.
5. Таев Н.С. Основы теории электрических аппаратов.- М.: Высшая школа. 1987.-351 с.
6. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов.-М.: Энергия, 1971.-558 с.
7. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов электрических аппаратов.-М.: Энергия, 1965.-574с.
8. Буль Б.К. и др. Основы теории электрических аппаратов./ Под ред. Бушкевича Г.В.-М:Высшая школа, 1970.-599 с.
9. Усатенко С.Т. и др. Выполнение электрических схем по ЕСКД.-М.: Изд. Стандартов, 1989.-324 с.
10. Чухнин А.А. Электрические аппараты. –М.:Энергоатомиздат, 1988.-718 с.