

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра электрического подвижного состава**

**И. С. ЕВДАСЕВ, Г. И. БУХАНЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА  
КОНТАКТОРА**

**Пособие по выполнению курсового проекта по дисциплине  
«Электрическое оборудование электрического транспорта»**

**Гомель 2006**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра электрического подвижного состава**

**И. С. ЕВДАСЕВ, Г. И. БУХАНЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА  
КОНТАКТОРА**

**Пособие по выполнению курсового проекта по дисциплине  
«Электрическое оборудование электрического транспорта»**

*Одобрено методической комиссией механического факультета*

**Гомель 2006**

УДК 62-523.2:681.527(075.8)  
ББК 31.291  
Е15

Рецензент – заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав»  
канд. техн. наук, доцент В. С. Могила (УО «БелГУТ»).

**Евдасев, И. С.**

Е15 Разработка электромагнитного привода контактора: пособие по выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрическое оборудование электрического транспорта» / И. С. Евдасев, Г. И. Буханевич. – Гомель: УО «БелГУТ», 2006. – 36 с.  
ISBN 985-468-089-4

Изложены алгоритмы расчетов механической и тяговой характеристик контактора, а также параметров катушки электромагнитного привода.

Пособие снабжено необходимым для расчетов справочным материалом, облегчающим работу студента над курсовым проектом.

Предназначено для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт».

**УДК 62–523.2:681.527 (075.8)**  
**ББК 31.291**

© Евдасев И. С., Буханевич Г. И., 2006  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2006

ISBN 985-468-089-4

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|     |                                                                                                            |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Общая характеристика проекта .....                                                                         | 5  |
| 2   | Разработка эскизного проекта конструкции контактора .....                                                  | 6  |
| 2.1 | Выбор типа магнитопровода, кинематической схемы подвижной части и размеров основных элементов .....        | 6  |
| 2.2 | Выбор и описание принципа действия элементов дугогашения .....                                             | 8  |
| 3   | Расчет и построение механической характеристики .....                                                      | 8  |
| 3.1 | Расчет сил тяжести подвижных элементов контактора .....                                                    | 8  |
| 3.2 | Выбор расчетных положений и расчет углов поворота подвижных элементов .....                                | 9  |
| 3.3 | Определение силы нажатия контактов .....                                                                   | 11 |
| 3.4 | Определение начальной силы нажатия контактов .....                                                         | 12 |
| 3.5 | Определение силы возвращающей пружины .....                                                                | 13 |
| 3.6 | Расчет равнодействующей сил сопротивления движению якоря .....                                             | 13 |
| 3.7 | Построение механической характеристики контактора .....                                                    | 14 |
| 4   | Расчет магнитных проводимостей рабочего и нерабочего воздушных зазоров и путей потоков рассеяния .....     | 14 |
| 4.1 | Магнитная проводимость воздушного рабочего зазора .....                                                    | 14 |
| 4.2 | Магнитная проводимость воздушного нерабочего зазора .....                                                  | 15 |
| 4.3 | Магнитная проводимость путей потоков рассеяния .....                                                       | 19 |
| 5   | Определение магнитодвижущей силы привода .....                                                             | 20 |
| 6   | Расчет характеристик магнитной цепи .....                                                                  | 21 |
| 6.1 | Составление схемы замещения магнитной цепи .....                                                           | 21 |
| 6.2 | Расчет сосредоточенной магнитодвижущей силы привода .....                                                  | 21 |
| 6.3 | Построение вебер-амперных характеристик участков скобы и сердечника .....                                  | 21 |
| 6.4 | Построение вебер-амперных характеристик путей потоков рассеяния .....                                      | 24 |
| 6.5 | Построение вебер-амперных характеристик якоря и воздушного нерабочего зазора .....                         | 24 |
| 6.6 | Построение вебер-амперных характеристик при дискретных значениях воздушного рабочего зазора .....          | 25 |
| 7   | Построение тяговой характеристики .....                                                                    | 25 |
| 7.1 | Определение магнитного потока в сечении воздушного рабочего зазора при заданной магнитодвижущей силе ..... | 25 |
| 7.2 | Определение падения магнитного напряжения в воздушном рабочем зазоре .....                                 | 26 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.3 Расчет электромагнитной силы привода .....                                      | 27 |
| 8 Расчет электромагнитной катушки .....                                             | 27 |
| 8.1 Определение размеров катушки .....                                              | 27 |
| 8.2 Определение параметров обмоточного провода.....                                 | 28 |
| 8.3 Тепловой расчет обмотки .....                                                   | 30 |
| Список литературы.....                                                              | 31 |
| Приложение А Кривые намагничивания сталей.....                                      | 32 |
| Приложение Б Параметры обмоточных проводов.....                                     | 33 |
| Приложение В Построение зависимости $\Phi_{\delta}(U_{\text{м}}^{\text{мм}})$ ..... | 34 |
| Приложение Г Построение зависимости $\Phi_{\delta}(U_{\text{м}\delta})$ .....       | 35 |
| Приложение Д Бланк задания на курсовой проект.....                                  | 36 |

## 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЕКТА

В процессе выполнения курсового проекта студент детально знакомится с конструкцией контактора и приобретает навыки расчетов механической характеристики электроаппарата клапанного типа, тяговой характеристики электромагнитного привода, температуры нагрева обмотки электромагнитной катушки.

Задачи, решаемые в проекте:

- 1) разработка эскизного проекта конструкции контактора (выбор типа магнитопровода, кинематической схемы подвижной части и размеров основных элементов; краткое описание работы элементов дугогашения);
- 2) расчет и построение механической характеристики;
- 3) расчет магнитных проводимостей рабочего и нерабочего воздушных зазоров и путей потоков рассеяния;
- 4) определение магнитодвижущей силы обмотки;
- 5) расчет характеристик магнитной цепи;
- 6) построение тяговой характеристики электромагнита;
- 7) расчет электромагнитной катушки (определение размеров каркаса, параметров обмотки и средней температуры нагрева обмотки);
- 8) заключение о работоспособности спроектированного аппарата и возможных направлениях оптимизации его характеристик.

При выполнении курсового проекта от студента требуется не только рассчитать требуемые величины и построить зависимости, но также дать краткие пояснения в тексте к полученным зависимостям. В конце пояснительной записки дается заключение, в котором отражаются результаты всей работы в целом и наиболее существенные результаты по каждому разделу. В заключение обязательно включается анализ работоспособности спроектированного аппарата и возможные направления оптимизации его характеристик. Объем заключения не должен превышать 2 страниц.

Пояснительная записка оформляется в соответствии с ГОСТ 2.105-95 «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам» и Р 50-77-88 «Рекомендации. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения диаграмм».

Бланк задания на курсовой проект представлен в приложении Д. Ориентировочный объем пояснительной записки – 45–50 страниц.

В графической части проекта выполняются эскиз контактора в масштабе с указанием основных размеров, схемы, диаграммы и характеристики, со-

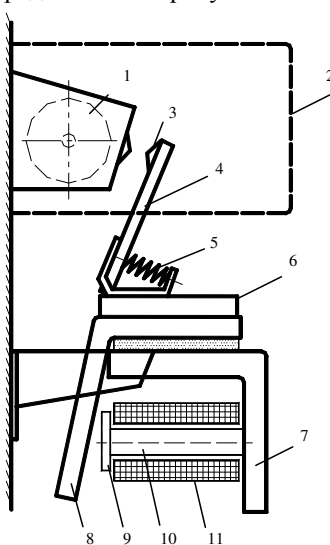
проводящие расчеты в пояснительной записке. Графическая часть выполняется на листах миллиметровой бумаги форматов А4 и А3.

## 2 РАЗРАБОТКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТОРА

### 2.1 Выбор типа магнитопровода, кинематической схемы подвижной части и размеров основных элементов

В курсовом проекте студент не осуществляет непосредственно выбор типа магнитопровода, кинематической схемы подвижной части и размеров основных элементов для проектируемого контактора, а принимает их аналогичными существующим согласно заданному контактору-прототипу.

Эскиз контактора чертится на листе А3 или А4 миллиметровой бумаги. При разработке эскиза необходимо стремиться к упрощению фигур конструктивных элементов, если это не влияет на кинематическую схему. Пример эскиза контактора представлен на рисунке 1.

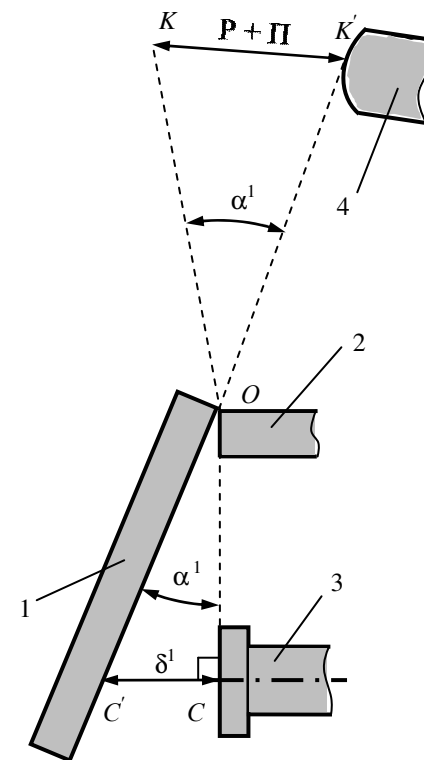


- 1 – дугогасительная катушка; 2 – дугогасительная камера; 3 – подвижный контакт;  
4 – держатель контакта; 5 – притирающая (контактная) пружина; 6 – изолирующая пластина;  
7 – скоба (ядро); 8 – яркорь; 9 – полюсный наконечник сердечника; 10 – сердечник;  
11 – электромагнитная катушка

Рисунок 1 – Эскиз контактора

Контактор чертится при разомкнутом положении контактов (контактами кверху). Для правильного определения положения яркоря контактора относи-

тельно торцевой поверхности наконечника сердечника необходимо первоначально рассчитать значение воздушного рабочего зазора  $\delta^1$  (рисунок 2).



- 1 – яркорь; 2 – скоба; 3 – наконечник сердечника; 4 – подвижный контакт

Рисунок 2 – Пример расчетной схемы для определения воздушного рабочего зазора

В приведенной расчетной схеме на рисунке 2 угол  $\alpha^1$ , на который повернется вся подвижная часть контактора при отсутствии неподвижного контакта, можно рассчитать по формуле

$$\alpha^1 = 2 \arcsin\left(\frac{P + \Pi}{2 \cdot OK}\right), \quad (1)$$

где P – раствор контактов, м;

Π – провал контактов, м;

OK – расстояние от точки вращения подвижной части до средней точки подвижного контакта, м.

Рабочий воздушный зазор в положении при разомкнутых контактах определяется из прямоугольного треугольника по формуле

$$\delta^I = OC \operatorname{tg} \alpha^I, \quad (2)$$

где  $OC$  – расстояние от точки вращения подвижной части до оси наконечника сердечника, м.

## 2.2 Выбор и описание принципа действия элементов дугогашения

Для разрабатываемого контактора выбираются элементы дугогашения. В пояснительной записке необходимо обосновать выбор этих элементов и привести краткое описание принципа гашения дуги выбранными элементами.

## 3 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 3.1 Расчет сил тяжести подвижных элементов контактора

Подвижная часть контактора условно разбивается на простые фигуры (параллелепипеды, цилиндры и т.д.), объем и центр тяжести которых легко вычисляются.

Сила тяжести  $j$ -го элемента  $Q_j$ , Н, рассчитывается по формуле

$$Q_j = V_j \rho_j g, \quad (3)$$

где  $V_j$  – объем  $j$ -го элемента подвижной части, м<sup>3</sup>;  
 $\rho_j$  – плотность материала  $j$ -го элемента, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Рекомендуется принимать в расчете для различных материалов значения плотности:

сталь – 7800 кг/м<sup>3</sup>;  
 медь – от 8700 до 8900 кг/м<sup>3</sup>;  
 серебро – 10500 кг/м<sup>3</sup>;  
 латунь – от 8400 до 8700 кг/м<sup>3</sup>;  
 текстолит – от 1300 до 1450 кг/м<sup>3</sup>;  
 высокополимерные материалы – от 1000 до 1400 кг/м<sup>3</sup>.

Силу тяжести и точку центра тяжести элементов сложной формы (крепёжные детали с пружинами и др.) студент принимает ориентировочно, используя навыки курсов теоретической механики и сопротивления материалов.

Точки и стрелки приложенных сил тяжести элементов подвижной части наносятся на эскиз контактора и обозначаются.

### 3.2 Выбор расчетных положений и расчет углов поворота подвижных элементов

Для построения механической характеристики обычно выбирают четыре расчетные положения:

- контакты полностью разомкнуты;
- перед соприкосновением контактов;
- после соприкосновения контактов;
- после окончания притирки (якорь плотно прижат к наконечнику сердечника).

Принимается допущение, что второе и третье положения (до и после соприкосновения контактов) отличаются только силой нажатия контактов  $P_{\kappa}^{III}$ . Во втором положении до соприкосновения контактов эта сила в расчетной схеме не учитывается, а в третьем – учитывается. Плечи действия всех остальных сил в этих положениях остаются без изменения.

Для каждого выбранного положения подвижной части строится расчетная схема. Для контактора, представленного на рисунке 1, приведен пример расчетной схемы в третьем положении (рисунок 3).

Углы поворота подвижных элементов контактора относительно точки  $O$  определяются по формулам:

из первого положения во второе (третье)

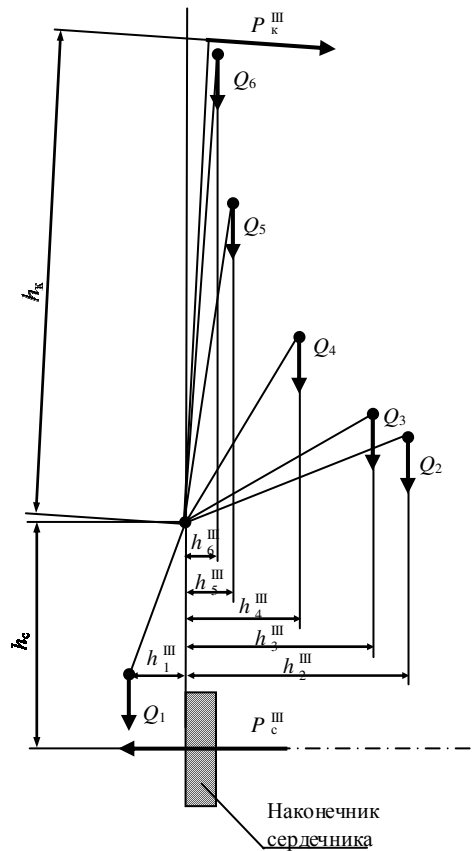
$$\alpha^{I-II} = 2 \arcsin\left(\frac{P}{2 \cdot OK}\right), \quad (4)$$

из третьего положения в четвертое

$$\alpha^{III-IV} = 2 \arcsin\left(\frac{P}{2 \cdot OK}\right). \quad (5)$$

Необходимо помнить, что держатель подвижного контакта и сам контакт при движении из третьего в четвертое положение совершает вращательное движение не только относительно точки  $O$ , но и относительно точки закрепления держателя контакта  $O_1$ , что обеспечивает сжатие притирающей пружины и притирание контактов. Следовательно, углы перемещения точек центров масс держателя подвижного контакта и самого контакта не могут быть рассчитаны по типовой формуле (5). Схема и расчетные формулы для определения центров масс указанных элементов составляются студентом самостоятельно исходя из фактической кинематической схемы контактора-прототипа.

Плечи действия сил в первом положении определяются из расчетной схемы, построенной по эскизу контактора. Для большей точности расчета плечи действия сил во втором (третьем) и четвертом положениях определяются расчетным путем с помощью известных значений углов  $\alpha^{I-II}$  и  $\alpha^{III-IV}$ .



$Q_1$  – сила тяжести притягиваемой части якоря;  $Q_2$  – сила тяжести непритягиваемой части якоря;  $Q_3$  – сила тяжести изолирующей пластины;  $Q_4$  – сила тяжести притягиваемой пружины и ее держателя;  $Q_5$  – сила тяжести держателя подвижного контакта;  $Q_6$  – сила тяжести подвижного контакта;  $P_{к}^{III}$  – сила нажатия контактов;  $P_{с}^{III}$  – равнодействующая сил сопротивления;  $h_1^{III}, h_2^{III}, \dots, h_6^{III}$  – плечи действия весов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_6$  соответственно;  $h_{к}$  – плечо действия силы нажатия контактов;  $h_{с}$  – плечо действия равнодействующей сил сопротивления

Рисунок 3 – Пример расчетной схемы 3-го положения (после соприкосновения контактов) контактора

В расчетных схемах кроме сил тяжести элементов подвижной части учитываются:

- сила нажатия контактов, направленная в сторону подвижного контакта;

- сила возвращающей пружины, которая приложена по оси пружины в точке крепления ее с элементом подвижной части и направлена в сторону этого элемента;

- равнодействующая сил сопротивления движению якоря, приложенная по оси сердечника контактора.

### 3.3 Определение силы нажатия контактов

Расчетная сила нажатия контактов в рабочем положении  $P_{к}^{IV}$ , Н, определяется по формуле

$$P_{к}^{IV} = \frac{I_{н}^2}{A_{к}b}, \quad (6)$$

где  $I_{н}$  – номинальный ток коммутируемой цепи, А;

$A_{к}$  – тепловая постоянная контакта,  $A^2/(мм \cdot Н)$ ; при  $I_{н} < 100$  А принимается равной от 8 до 21  $A^2/(мм \cdot Н)$ , при  $I_{н} > 100$  А – от 31 до 41  $A^2/(мм \cdot Н)$ ;

$b$  – ширина контакта, мм.

Найденное значение силы нажатия контактов проверяется по условиям их пластической деформации при нагревании током и сваривания контактов. Переходное сопротивление контактов  $R_{к}$ , Ом, определяется по формуле

$$R_{к} = \frac{K}{(P_{к}^{IV})^m}, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала контактов,  $Ом \cdot Н^m$ ; приведен в таблице 1;

$m$  – коэффициент формы контактной поверхности; для точечного контакта  $m = 0,5$ ; для линейного – от 0,5 до 0,7; для плоскостного – от 0,7 до 1,0.

Предельный ток, не вызывающий пластической деформации контактов  $I_{пр}$ , А, рассчитывается по формуле

$$I_{пр} = 0,5 \frac{\Delta U_{рек}}{R_{к}} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{рек}$  – падение напряжения в переходном сопротивлении контакта при размягчении материала, мВ; значения приведены в таблице 2.

Для обеспечения надежной работы без размягчения материала контактов и их сваривания необходимо выполнение следующих условий:

$$I_{пр} > I_{н} K_{пэ}, \quad (9)$$

$$I_{\text{пр}} \leq K_{\text{св}} \sqrt{10P_{\text{к}}^{\text{IV}}}, \quad (10)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент эксплуатационной перегрузки; обычно для тяговых цепей электроподвижного состава принимается от 1,5 до 2;

$K_{\text{св}}$  – коэффициент сваривания контактов,  $\text{A/H}^{0,5}$ ; значения приведены в таблице 3.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $K$

| Материал контактов                | $K$ , $\text{Ом} \cdot \text{H}^{\text{м}}$ |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| Медь – медь (плоскостной контакт) | $(0,09 - 0,14) \cdot 10^{-3}$               |
| Медь – медь (точечный контакт)    | $(0,14 - 0,18) \cdot 10^{-3}$               |
| Медь – медь (луженые поверхности) | $(0,07 - 0,10) \cdot 10^{-3}$               |
| Медь – латунь                     | $0,38 \cdot 10^{-3}$                        |
| Латунь – латунь                   | $0,67 \cdot 10^{-3}$                        |
| Латунь – сталь                    | $3,04 \cdot 10^{-3}$                        |
| Медь – сталь                      | $3,1 \cdot 10^{-3}$                         |
| Серебро – серебро                 | $0,06 \cdot 10^{-3}$                        |

Таблица 2 – Падение напряжения в переходном сопротивлении контакта при размягчении материала

| Материал контактов | $\Delta U_{\text{рек}}$ , мВ |
|--------------------|------------------------------|
| Медь               | 120                          |
| Серебро            | 90                           |

Таблица 3 – Коэффициент сваривания контактов рычажного типа

| Материал контактов | $K_{\text{св}}$ , $\text{A/H}^{0,5}$ |
|--------------------|--------------------------------------|
| Медь – медь        | 410                                  |
| Латунь – латунь    | 505                                  |
| Медь – латунь      | 575                                  |

При несоблюдении одного из условий (9) или (10) необходимо изменить материал контактов или их геометрические размеры и сделать повторный расчет.

### 3.4 Определение начальной силы нажатия контактов

Начальная сила нажатия контактов определяется по сжатию притирающей пружины при повороте держателя подвижного контакта из положения III в положение IV.

Для упрощения расчетов можно принять следующие допущения:

- при притирании контактов точка их касания  $K$  не изменяет положения;
- сила притирающей пружины возрастает пропорционально уменьшению ее длины по оси пружины.

С учетом принятых допущений начальную силу нажатия контактов рекомендуется определять по следующему алгоритму:

1) рассчитывается сила притирающей пружины в четвертом положении  $P_{\text{пр}}^{\text{IV}}$  по известному значению  $P_{\text{к}}^{\text{IV}}$  из равенства моментов относительно точки закрепления держателя подвижного контакта  $O_1$ ;

2) составляется расчетная схема с учетом поворота точки  $O_1$  на угол  $\alpha^{\text{III-IV}}$  относительно точки  $K$  и рассчитывается уменьшение длины  $\Delta l_{\text{пр}}$  притирающей пружины;

3) рассчитывается сила притирающей пружины в третьем положении  $P_{\text{пр}}^{\text{III}}$ , Н, по формуле

$$P_{\text{пр}}^{\text{III}} = P_{\text{пр}}^{\text{IV}} - C_{\text{пр}} \Delta l_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – жесткость притирающей пружины, Н/м;

4) рассчитывается сила начального нажатия контактов  $P_{\text{к}}^{\text{III}}$  по известному значению  $P_{\text{пр}}^{\text{III}}$  из равенства моментов относительно точки закрепления держателя подвижного контакта  $O_1$ .

### 3.5 Определение силы возвращающей пружины

Начальная сила возвращающей пружины  $P_{\text{в}}^{\text{I}}$  в положении I контактора принимается по индивидуальному заданию на курсовой проект.

Сила возвращающей пружины в  $i$ -том положении  $P_{\text{в}}^i$ , Н, рассчитывается по формуле

$$P_{\text{в}}^i = P_{\text{в}}^{\text{I}} + C_{\text{в}} \Delta l_{\text{в}}^{1-i}, \quad (12)$$

где  $C_{\text{в}}$  – жесткость возвращающей пружины, Н/м;

$\Delta l_{\text{в}}^{1-i}$  – изменение длины возвращающей пружины при повороте подвижной части из первого положения в  $i$ -тое положение, м.

Изменение длины возвращающей пружины  $\Delta l_{\text{в}}^{1-i}$  определяется из расчетной схемы, в которой учитывается, что точка закрепления пружины (по оси) на подвижной части контактора поворачивается на углы  $\alpha^{1-\text{II}}$  и  $\alpha^{\text{III-IV}}$ .

### 3.6 Расчет равнодействующей сил сопротивления движению якоря

Равнодействующая сил сопротивления  $P_{\text{с}}^i$ , Н, в  $i$ -том положении контактора рассчитывается на основе расчетных схем по формуле

$$P_{\text{с}}^i = \frac{P_{\text{в}}^i h_{\text{в}}^i + P_{\text{к}}^i h_{\text{к}}^i \pm \sum_{j=1}^n Q_j h_j^i}{h_{\text{с}}}, \quad (13)$$

где  $h_{\text{в}}^i$  – плечо действия силы возвращающей пружины относительно точки  $O$ , м;

- $h_k^i$  – плечо действия силы нажатия контактов относительно точки O, м;
- $h_j^i$  – плечо действия веса  $j$ -го элемента подвижной части относительно точки O, м;
- $h_c$  – плечо действия равнодействующей сил сопротивления, приложенная по оси сердечника, относительно точки O, м.

### 3.7 Построение механической характеристики контактора

Определяется рабочий воздушный зазор во втором (третьем) положении определяется по формуле

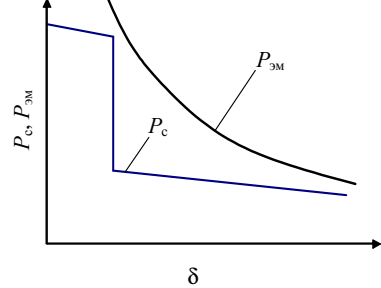


Рисунок 4 – Пример механической и тяговой характеристик контактора

$$\delta^{II(III)} = OC \operatorname{tg} \alpha^{III-IV}. \quad (14)$$

Рабочий воздушный зазор в четвертом положении равен нулю.

Механическая характеристика контактора представляет собой ломаную линию, показывающую зависимость равнодействующей сил сопротивления движению якоря  $P_c^i$  от рабочего воздушного зазора  $\delta^i$  (рисунок 4).

## 4 РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ РАБОЧЕГО И НЕРАБОЧЕГО ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ И ПУТЕЙ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ

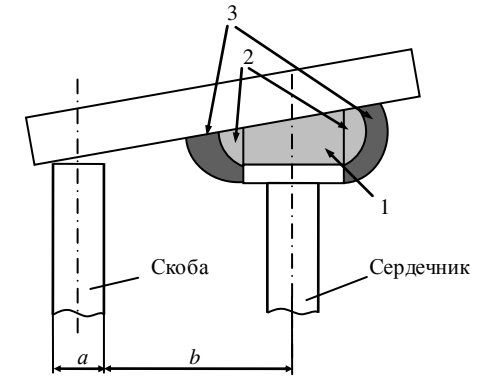
### 4.1 Магнитная проводимость воздушного рабочего зазора

Воздушный рабочий зазор между наконечником сердечника и поворотным якорем контактора клапанного типа может быть представлен типичной расчетной схемой (рисунок 5).

Магнитная проводимость между торцом полюсного наконечника и якорем  $G_{\delta 1}$ , Гн,

$$G_{\delta 1} = \frac{\pi \mu_b \mu_0 r_n^2}{\delta} \left( 1 + \frac{r_n^2}{4(a+b)^2} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

- где  $\mu_b$  – относительная магнитная проницаемость воздуха, отн. ед.;  $\mu_b = 1$ ;
- $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;
- $r_n$  – радиус полюсного наконечника сердечника (см.рисунок 5), мм;
- $\delta$  – рабочий воздушный зазор по оси сердечника, мм;
- $a$  – толщина скобы (см.рисунок 5), мм;
- $b$  – расстояние от скобы до оси сердечника (см.рисунок 5), мм.



1 – зона проводимости между торцом полюсного наконечника и якорем; 2 – зона проводимости между ребром полюсного наконечника и якорем; 3 – зона проводимости между боковой поверхностью полюсного наконечника и якорем

Рисунок 5 – Расчетная схема определения магнитной проводимости воздушного рабочего зазора

Магнитная проводимость между ребром полюсного наконечника и якорем  $G_{\delta 2}$ , Гн,

$$G_{\delta 2} = 0,58 \mu_b \mu_0 (5,14r_n + 1,57\delta) \cdot 10^{-3}. \quad (16)$$

Магнитная проводимость между боковой поверхностью полюсного наконечника и якорем  $G_{\delta 3}$ , Гн,

$$G_{\delta 3} = 2h_n \mu_b \mu_0 \left( 1 + \frac{4r_n}{h_n + 2\delta} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где  $h_n$  – высота полюсного наконечника сердечника, мм.

Полная магнитная проводимость воздушного рабочего зазора  $G_{\delta}$ , Гн,

$$G_{\delta} = G_{\delta 1} + G_{\delta 2} + G_{\delta 3}. \quad (18)$$

По формулам (15) – (18) рассчитываются магнитные проводимости для ряда значений (от 5 до 7) воздушного рабочего зазора в диапазоне  $(0,05 \dots 1,0)\delta^I$ .

### 4.2 Магнитная проводимость воздушного нерабочего зазора

Определение магнитной проводимости воздушного нерабочего зазора осуществляется по методу вероятностных путей магнитного потока. Суть этого метода заключается в замене сложной конфигурации магнитного потока в воздушном нерабочем зазоре на элементарные участки, представляющие собой простые геометрические фигуры. Для упрощения расчетов делается еще одно допущение – клиновидный зазор заменяется плоскопарал-



лельным. Расчетная схема для определения значения воздушного нерабочего зазора  $\delta_n$  приведена на рисунке 6. Воздушный нерабочий зазор принимается равным максимальному зазору по оси скобы при полностью разомкнутом якоре. При движении якоря воздушный нерабочий зазор будет уменьшаться, а его магнитная проводимость увеличиваться. Учитывая значительно меньшее изменение воздушного нерабочего зазора по сравнению с рабочим зазором  $\delta$ , принимаем в расчетах только одно значение его магнитной проводимости при максимальном зазоре. Это допущение приведет к небольшому увеличению необходимой силы притяжения электромагнита.

Пример разбиения магнитного потока воздуха нерабочего зазора контактора приведен на рисунке 7.

Для каждого элементарного участка с некоторым приближением можно аналитически определить его магнитную проводимость, которая будет равна отношению среднего значения сечения фигуры в плоскости, перпендикулярной пути магнитного потока, к средней длине линии магнитной индукции. Формулы для расчета магнитной проводимости простых фигур приведены в таблице 4.

Полная магнитная проводимость воздушного нерабочего зазора  $G_{\delta_n}$ , Гн,

$$G_{\delta_n} = \sum_{j=1}^n G_j, \quad (19)$$

где  $n$  – количество элементарных участков, на которые разбит магнитный поток воздушного нерабочего зазора;

$G_j$  – магнитная проводимость  $j$ -того элементарного участка, Гн; формулы для расчета приведены в таблице 4.

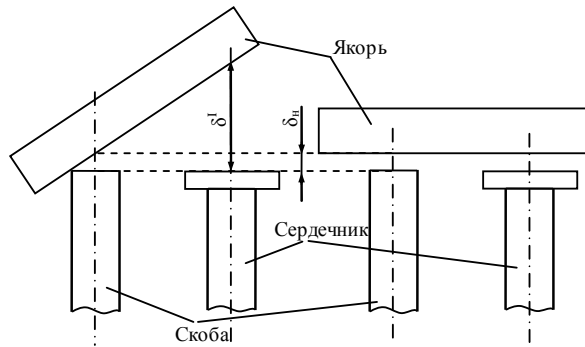
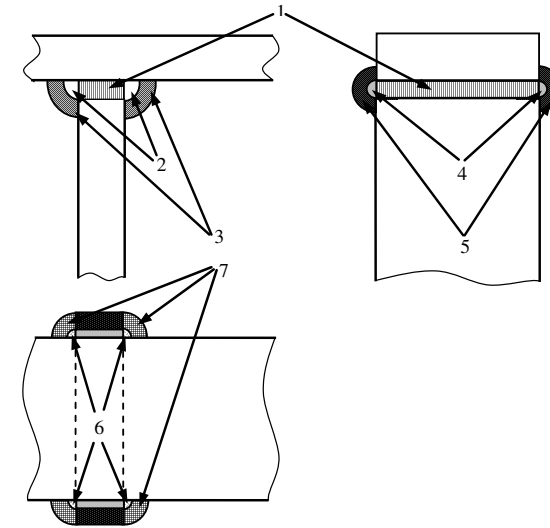


Рисунок 6 – Схема расчета воздушного нерабочего зазора



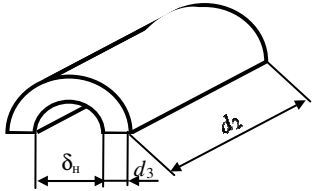
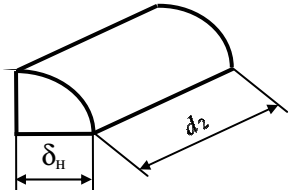
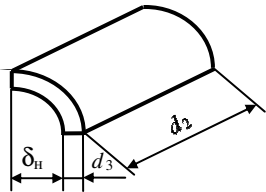
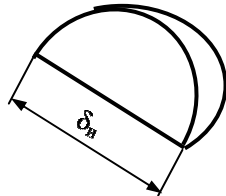
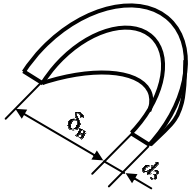
1 – параллелепипед; 2 – четверть цилиндра; 3 – четверть оболочки цилиндра; 4 – полуцилиндр; 5 – оболочка полуцилиндра; 6 – сферический квадрант; 7 – оболочка сферического квадранта

Рисунок 7 – Схема разбиения магнитного потока воздушного нерабочего зазора для расчета его магнитной проводимости

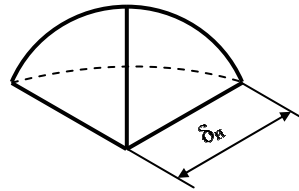
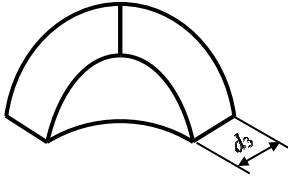
Таблица 4 – Формулы для расчета магнитной проводимости простых фигур

| Фигура         | Вид | Расчетная формула*                                         |
|----------------|-----|------------------------------------------------------------|
| Параллелепипед |     | $G_j = \mu_b \mu_0 \frac{d_1 d_2}{\delta_n} \cdot 10^{-3}$ |
| Полуцилиндр    |     | $G_j = 0,26 \mu_b \mu_0 d_2 \cdot 10^{-3}$                 |

Продолжение таблицы 4

| Фигура                          | Вид                                                                                 | Расчетная формула*                                                                          |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Оболочка полуцилиндра           |    | $G_j = \mu_b \mu_0 \frac{d_2}{\pi} \ln\left(1 + \frac{2d_3}{\delta_n}\right) \cdot 10^{-3}$ |
| Четверть цилиндра               |    | $G_j = 0,52 \mu_b \mu_0 d_2 \cdot 10^{-3}$                                                  |
| Оболочка четверти цилиндра      |    | $G_j = \mu_b \mu_0 \frac{2d_2}{\pi} \ln\left(1 + \frac{d_3}{\delta_n}\right) \cdot 10^{-3}$ |
| Сферический квадрант            |   | $G_j = 0,077 \mu_b \mu_0 \delta_n \cdot 10^{-3}$                                            |
| Оболочка сферического квадранта |  | $G_j = 0,25 \mu_b \mu_0 d_3 \cdot 10^{-3}$                                                  |

Продолжение таблицы 4

| Фигура                        | Вид                                                                                 | Расчетная формула*                               |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Сферический октант            |  | $G_j = 0,308 \mu_b \mu_0 \delta_n \cdot 10^{-3}$ |
| Оболочка сферического октанта |  | $G_j = 0,5 \mu_b \mu_0 d_3 \cdot 10^{-3}$        |

\* В формулах размеры  $d_1, d_2, d_3, \delta_n$  – в миллиметрах. Значение  $d_3$  принимается равным  $(2...3)\delta_n$ .

### 4.3 Магнитная проводимость путей потоков рассеяния

Магнитный поток в электромагнитной системе контактора клапанного типа замыкается не только по стальным частям скобы, сердечника и якоря, но также по воздушным путям между сердечником и скобой. Эти пути принято называть путями потоков рассеяния. Удельная проводимость их  $g_p$ , Гн/м, рассчитывается по формуле

$$g_p = \mu_b \mu_0 \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{b + \sqrt{b^2 - r_c^2}}{r_c}\right)}, \quad (20)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от геометрии магнитопровода; принимается в диапазоне от 0,5 до 0,6;

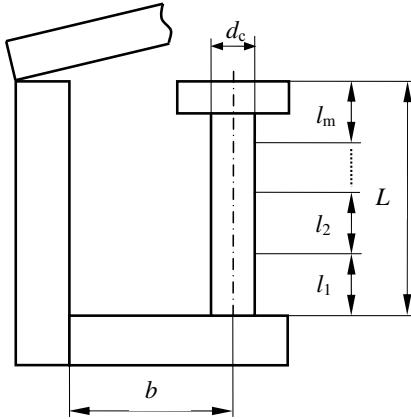
$r_c$  – радиус сердечника, мм.

Для составления схемы замещения магнитной цепи сердечник и скоба разбиваются на  $m$  равных участков, как это показано на рисунке 8. В проекте рекомендуется принимать значение участков от 4 до 6. Большее количество участков приводит к более точным результатам расчета, но увеличивает его трудоемкость.

Магнитная проводимость  $i$ -го расчетного участка  $G_{pi}$ , Гн,

$$G_{pi} = g_p l_i \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -го расчетного участка, мм.



$L$  – длина сердечника с наконечником;  $d_c$  – диаметр сердечника;  
 $b$  – расстояние от скобы до оси сердечника;  $l_1, l_2, \dots, l_m$  – длина расчетных участков

Рисунок 8 – Схема разбиения сердечника и скобы для составления  
схемы замещения магнитной цепи

## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРИВОДА

Для срабатывания контактора сила притяжения, создаваемая электромагнитной катушкой  $P_{эм}$  во всем диапазоне воздушных рабочих зазоров, должна быть больше равнодействующей сил сопротивления  $P_c$ . Предварительно принимая запас электромагнитной силы равным 30 %, рассчитывают ее значения  $P_{эм}^I$ , Н, для первого и третьего положений контактора:

$$P_{эм}^I = 1,3 P_c^I, \quad (22)$$

$$P_{эм}^{III} = 1,3 P_c^{III}. \quad (23)$$

Для рассчитанных значений электромагнитной силы определяем магнитодвижущую силу привода  $F^I$ , А,

$$F^I = \sqrt{\frac{2P_{эм}^I(\delta^I)^2}{\mu_B \mu_0 \pi r_H^2}}, \quad (24)$$

$$F^{III} = \sqrt{\frac{2P_{эм}^{III}(\delta^{III})^2}{\mu_B \mu_0 \pi r_H^2}}. \quad (25)$$

Выбирается большее из полученных значений по формулам (24) и (25) и определяется магнитодвижущая сила  $F$ , А,

$$F = (1,5 \dots 2,0) F^{i \text{ макс}}. \quad (26)$$

Коэффициент от 1,5 до 2,0 учитывает потери магнитного потока в воздушном нерабочем зазоре и на рассеяние.

## 6 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

### 6.1 Составление схемы замещения магнитной цепи

Магнитная цепь привода контактора разбивается на  $m$  равных участков (см. п. 4.3). В пределах каждого участка распределенные параметры цепи заменяются сосредоточенными:

- магнитным сопротивлением скобы  $R_{скi}$ ;
- магнитным сопротивлением сердечника  $R_{ci}$ ;
- магнитным сопротивлением основания скобы  $R_{скo}$ ;
- магнитным сопротивлением якоря  $R_{я}$ ;
- магнитным сопротивлением воздушного рабочего зазора  $R_{\delta}$ ;
- магнитным сопротивлением воздушного нерабочего зазора  $R_{\delta n}$ ;
- магнитной проводимостью путей потоков рассеяния  $G_{pi}$ ;
- магнитодвижущей силой  $F_i$ .

На основании этой замены составляем схему замещения магнитной цепи. Пример этой схемы приведен на рисунке 9.

### 6.2 Расчет сосредоточенной магнитодвижущей силы привода

Сосредоточенная на  $i$ -том участке магнитодвижущая сила привода  $F_i$ , А,

$$F_i = \frac{F}{m}, \quad (27)$$

где  $m$  – количество расчетных участков.

### 6.3 Построение вебер-амперных характеристик участков скобы и сердечника

В курсовом проекте рекомендуется принимать сталь, из которой сделаны скоба, сердечник и якорь одной марки. Марка стали задается в индивидуальном задании. Кривые намагничивания сталей приведены в приложении А. На листе миллиметровой бумаги строится кривая намагничивания стали, которая необходима для дальнейших расчетов.

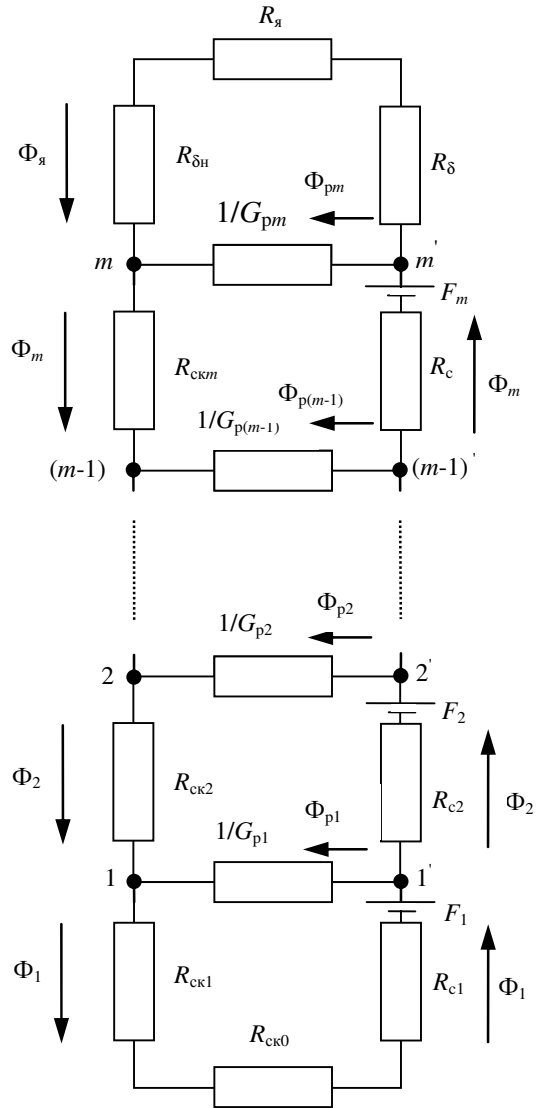


Рисунок 9 – Схема замещения магнитной цепи

Расчет вебер-амперных характеристик участков скобы и сердечника начинается с элемента с меньшим поперечным сечением  $S'$ . Элемент с мень-

шим сечением имеет большую магнитную индукцию  $B'$ , что позволит при расчете элемента с большим поперечным сечением  $S''$  избежать выхода в зону насыщения стали.

Задаются рядом (от 8 до 10 значений) магнитной индукции  $B_j'$  в диапазоне от 0 до 0,85 относительного значения индукции насыщения. По кривой намагничивания определяются значения соответствующих напряженностей  $H_j'$ .

Падение магнитного напряжения на участках элемента с меньшим сечением  $\Delta U_{mj}'$ , А,

$$\Delta U_{mj}' = H_j' l_i, \quad (28)$$

где  $H_j'$  – напряженность магнитного поля для расчетных точек элемента с меньшим сечением, А/мм.

На участках скобы и сердечника протекает одинаковый по значению магнитный поток  $\Phi_j$ , Вб, который можно рассчитать по формуле

$$\Phi_j = B_j' S', \quad (29)$$

где  $B_j'$  – магнитная индукция для расчетных точек элемента с меньшим сечением, Тл;

$S'$  – меньшее поперечное сечение скобы или сердечника, м<sup>2</sup>.

Магнитная индукция для расчетных точек элемента с большим сечением  $B_j''$ , Тл,

$$B_j'' = \frac{\Phi_j}{S''}, \quad (30)$$

где  $S''$  – большее поперечное сечение скобы или сердечника, м<sup>2</sup>.

Для каждого значения  $B_j''$  по кривой намагничивания стали определяется значение напряженностей магнитного поля  $H_j''$ .

Падение магнитного напряжения на участках элемента с большим сечением  $\Delta U_{mj}''$ , А,

$$\Delta U_{mj}'' = H_j'' l_i, \quad (31)$$

где  $H_j''$  – напряженность магнитного поля для расчетных точек элемента с большим сечением, А/мм.

Падение магнитного напряжения на основании скобы  $\Delta U_{мско j}$ , А,

$$\Delta U_{мско j} = H_{ско j} l_{ско}, \quad (32)$$

где  $H_{ско j}$  – напряженность магнитного поля для расчетных точек скобы, А/мм;

$l_{ско}$  – длина магнитной линии в скобе, мм.

Полное падение магнитного напряжения на расчетном участке  $\Delta U_{mj}$ , А: для первого участка

$$\Delta U_{mj} = \Delta U_{мско j} + \Delta U_{mj}'' + \Delta U_{mj}', \quad (33)$$

для участка 2...т

$$\Delta U_{м(2...т)j} = \Delta U_{mj}'' + \Delta U_{mj}' \quad (34)$$

На основе результатов расчета по формулам (29), (33) и (34) на листе миллиметровой бумаги формата А3 строятся вебер-амперные характеристики участков скобы и сердечника отдельно для первого и остальных расчетных участков (приложение В).

#### 6.4 Построение вебер-амперных характеристик путей потоков рассеяния

Магнитный поток путей рассеяния  $\Phi_{pi}$ , Вб, рассчитывается по формуле

$$\Phi_{pi} = \Delta U_{mpi} G_{pi} \quad (35)$$

где  $\Delta U_{mpi}$  – падение магнитного напряжения на средней длине магнитных линий рассеяния, А.

Согласно формуле (20) магнитная проводимость путей потоков рассеяния зависит только от геометрических размеров магнитопровода, поэтому их вебер-амперная характеристика описывается прямой линией, проходящей через начало координат. Для построения характеристики задаются произвольным значением  $\Delta U_{mpi}$  и по формуле (35) определяется  $\Phi_{pi}$ .

Построение вебер-амперной характеристики путей потоков рассеяния производится на общей диаграмме с вебер-амперными характеристиками участков скобы и сердечника (см. приложение В).

#### 6.5 Построение вебер-амперных характеристик якоря и воздушного нерабочего зазора

Из кривой намагничивания стали (см. п. 6.3) выбирается от 8 до 10 значений магнитной индукции  $B_{яj}$  в диапазоне от 0 до 0,85 относительного значения индукции насыщения (рекомендуется выбирать  $B_{яj}$  из ряда значений магнитной индукции в скобе) и определяются значения соответствующих напряженностей  $H_{яj}$ .

Магнитный поток в сечении якоря  $\Phi_{яj}$ , Вб,

$$\Phi_{яj} = B_{яj} S_{я} \quad (36)$$

где  $B_{яj}$  – магнитная индукция для расчетных точек якоря, Тл;

$S_{я}$  – поперечное сечение якоря, м<sup>2</sup>.

Падение магнитного напряжения на основании скобы  $\Delta U_{мяj}$ , А,

$$\Delta U_{мяj} = H_{яj} l_{я} \quad (37)$$

где  $H_{яj}$  – напряженность магнитного поля для расчетных точек якоря, А/мм;

$l_{я}$  – длина магнитной линии в якоре, мм.

Согласно расчетной схеме (см. рисунок 9) магнитные потоки в воздушном нерабочем зазоре  $\Phi_{\deltaн}$  и в якоре  $\Phi_{я}$  одинаковые по значению, тогда падение магнитного напряжения в воздушном нерабочем зазоре  $\Delta U_{м\deltaнj}$ , А,

$$\Delta U_{м\deltaнj} = \frac{\Phi_{яj}}{G_{\deltaн}} \quad (38)$$

Построение суммарной вебер-амперной характеристики якоря и воздушного нерабочего зазора  $\Phi_{я}(\Delta U_{мя} + \Delta U_{м\deltaн})$  или  $\Phi_{\delta}(\Delta U_{мя} + \Delta U_{м\deltaн})$  производится на листе миллиметровой бумаги формата А3 (приложение Г).

#### 6.6 Построение вебер-амперных характеристик при дискретных значениях воздушного рабочего зазора

При неизменном воздушном рабочем зазоре  $\delta_i$  его вебер-амперная характеристика описывается линейной зависимостью

$$\Phi_{\delta i} = \Delta U_{м\delta i} G_{\delta i} \quad (39)$$

где  $\Phi_{\delta i}$  – магнитный поток в сечении рабочего воздушного зазора при  $i$ -том его значении, Вб;

$\Delta U_{м\delta i}$  – падение магнитного напряжения в воздушном рабочем зазоре при  $i$ -том его значении, А.

Магнитная проводимость  $G_{\delta i}$  и количество расчетных значений воздушного рабочего зазора определялись ранее в п. 4.1. Для каждого расчетного значения  $\delta_i$  строится вебер-амперная характеристика, для построения которой необходимо задаться произвольными значениями  $\Delta U_{м\delta i}$  и по формуле (39) определить соответствующие значения  $\Phi_{\delta i}$ .

Семейство вебер-амперных характеристик при разных значениях рабочего воздушного зазора строится на общей диаграмме с вебер-амперной характеристикой якоря и воздушного нерабочего зазора (см. приложение Г).

## 7 ПОСТРОЕНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 7.1 Определение магнитного потока в сечении воздушного рабочего зазора при заданной магнитодвижущей силе

Для схемы замещения магнитной цепи (см. рисунок 9) составляются уравнения по правилам Кирхгофа:

$$U_M^{11'}(\Phi_1) = F_1(\Phi_1) - \Delta U_{M1}(\Phi_1), \quad (40)$$

$$\Phi_2(U_M^{11'}) = \Phi_1(U_M^{11'}) - \Phi_{p1}(U_M^{11'}), \quad (41)$$

$$U_M^{22'}(\Phi_2) = F_2(\Phi_2) + U_M^{11'}(\Phi_2) - \Delta U_{M(2\dots m)}(\Phi_2), \quad (42)$$

$$\Phi_3(U_M^{22'}) = \Phi_2(U_M^{22'}) - \Phi_{p2}(U_M^{22'}), \quad (43)$$

•  
•  
•

$$U_M^{mm'}(\Phi_m) = F_m(\Phi_m) + U_M^{(m-1)(m-1')}(\Phi_m) - \Delta U_{M(2\dots m)}(\Phi_m), \quad (44)$$

$$\Phi_\delta(U_M^{mm'}) = \Phi_m(U_M^{mm'}) - \Phi_{pm}(U_M^{mm'}), \quad (45)$$

где  $U_M^{11'}$ ,  $U_M^{22'}$ ,  $U_M^{mm'}$  – разность магнитных напряжений между точками 1 и 1', 2 и 2', m и m' соответственно, А;

$\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_m$ ,  $\Phi_\delta$  – магнитный поток на первом, втором, m-ном участках и в рабочем воздушном зазоре соответственно, Вб.

На диаграмме вебер-амперных характеристик участков скобы и сердечника и путей потоков рассеяния дополнительно строится зависимость магнитодвижущей силы для i-того участка  $F_i(\Phi_i)$ , которая представляет собой прямую линию, параллельную оси ординат и пересекающую ось абсцисс в точке  $F_i$ , рассчитанной по формуле (27).

На этой же диаграмме выполняется графическое решение уравнений Кирхгофа (см. приложение В). При этом уравнения (40), (42) и (44) решаются суммированием и вычитанием абсцисс соответствующих зависимостей, а уравнения (41), (43) и (45) – ординат.

В результате построений определяется зависимость магнитного потока в воздушном рабочем зазоре от разности потенциалов между точками последнего расчетного участка (m и m'). Эта зависимость переносится на диаграмму с вебер-амперными характеристиками якоря и воздушного нерабочего зазора, а также семейством характеристик воздушного рабочего зазора при разных его дискретных значениях.

## 7.2 Определение падения магнитного напряжения в воздушном рабочем зазоре

По второму правилу Кирхгофа составляем уравнение для последнего контура расчетной схемы (см. рисунок 9)

$$\Delta U_{M\delta}(\Phi_\delta) = U_M^{mm'}(\Phi_\delta) - [\Delta U_{Mя} + \Delta U_{M\delta H}] (\Phi_\delta). \quad (46)$$

Решение этого уравнения осуществляется графическим способом на диаграмме, где построены вебер-амперные характеристики якоря и воздушного нерабочего зазора (см. приложение Г).

Определение падения магнитного напряжения в рабочем воздушном зазоре  $\Delta U_{M\delta i}$  при дискретных значениях этого зазора осуществляется на этой же диаграмме по точкам пересечения зависимости  $U_{M\delta}(\Phi_\delta)$  и семейства характеристик, построенных для значений воздушного рабочего зазора в диапазоне  $(0,05 \dots 1,0)\delta^1$  по формуле (39).

## 7.3 Расчет электромагнитной силы привода

Электромагнитная сила привода  $P_{эмi}$ , Н, при i-том значении воздушного рабочего зазора рассчитывается по формуле

$$P_{эмi} = 0,5 \Delta U_{M\delta i}^2 \left| \left( \frac{dG_\delta}{d\delta} \right)_i \right|. \quad (47)$$

Дифференциал  $\left( \frac{dG_\delta}{d\delta} \right)_i$  определяется взятием производных по  $\delta$  уравнений (15), (16) и (17).

По рассчитанным значениям  $P_{эмi}$  для ряда  $\delta_i$  строится тяговая характеристика электромагнитного привода контактора. Построение осуществляется на общей диаграмме с механической характеристикой (см. рисунок 4).

По расположению тяговой и механической характеристик необходимо сделать вывод о работоспособности контактора и путях его совершенствования.

## 8 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАТУШКИ

### 8.1 Определение размеров катушки

Обмотка электромагнитного привода контактора может быть трех типов:

- 1) намотанная на каркас;
- 2) бескаркасная;
- 3) намотанная на предварительно изолированный сердечник.

Пример каркасной обмотки представлен на рисунке 10.

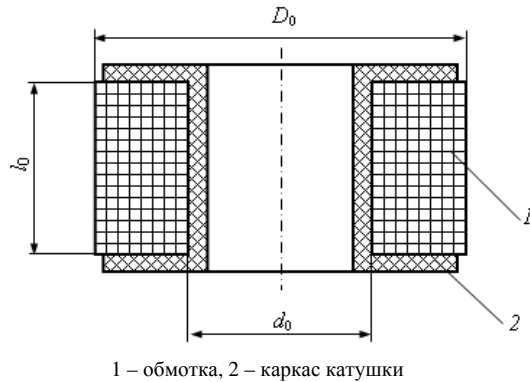


Рисунок 10 – Катушка электромагнита каркасного типа

Согласно выбранному типу катушки рассчитывается сечение обмотки  $S_{об}, \text{м}^2$ ,

$$S_{об} = k_{об} \frac{D_0 - d_0}{2} l_0, \quad (48)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент заполнения окна (пространства для укладки проводников) обмоткой; принимается равным от 0,8 до 0,9;

$D_0$  – внешний диаметр окна, м;  
 $d_0$  – внутренний диаметр окна, м;  
 $l_0$  – высота окна, м.

## 8.2 Определение параметров обмоточного провода

Средняя длина витка  $l_{cp}$ , м,

$$l_{cp} = \pi \frac{D_0 + d_0}{2}. \quad (49)$$

Назначается допустимая температура нагрева обмотки  $t_p$ :

– для класса изоляции Y до 90 °С (волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, непропитанные и непогруженные в жидкий электроизоляционный материал);

– для класса изоляции A до 105 °С (волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или натурального, искусственного и синтетического шелка, пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал);

– для класса изоляции E до 120 °С (синтетические органические материалы, например, пленки, волокна, смолы и др., или их простые сочетания);

– для класса изоляции B до 130 °С (материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами);

– для класса изоляции F до 155 °С (материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами);

– для класса изоляции H до 180 °С (материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганическими эластомерами);

Удельное сопротивление провода при рабочей температуре  $\rho_t$ , Ом·м,

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(t_p - 20)], \quad (50)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление меди при 20 °С, Ом·м;

$$\rho_0 = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$\alpha$  – температурный коэффициент удельного сопротивления меди, °С<sup>-1</sup>;  
 при температурах от 0 до 150 °С  $\alpha = 0,0043$  °С<sup>-1</sup>;

$t_p$  – рабочая температура обмотки, °С.

Расчетное сечение провода по меди  $q'_M, \text{м}^2$ ,

$$q'_M = \frac{F \rho_t l_{cp}}{U_n}, \quad (51)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение цепей управления, В.

Расчетный диаметр провода без изоляции  $d'_M, \text{м}$ ,

$$d'_M = \sqrt{\frac{4q'_M}{\pi}}. \quad (52)$$

По приложению Б выбираем провод ближайшего большего сечения  $d_M$  и определяем диаметр провода с изоляцией  $d_n$ .

Уточненное сечение провода по меди  $q_M, \text{м}^2$ ,

$$q_M = \frac{\pi d_M^2}{4}, \quad (53)$$

где  $d_M$  – диаметр провода без изоляции, м.

Уточненное сечение провода с изоляцией  $q_n, \text{м}^2$ ,

$$q_n = \frac{\pi d_n^2}{4}, \quad (54)$$

где  $d_n$  – диаметр провода с изоляцией, м.

Коэффициент заполнения обмотки медью  $k_{3M}$

$$k_{3M} = k_y \frac{q_M}{q_n}, \quad (55)$$

где  $k_y$  – коэффициент укладки провода; для рядовой намотки принимается от 0,9 до 0,95, для шахматной – от 0,95 до 1,05, для неравномерной – от 0,7 до 0,8.

Количество витков обмотки  $W$

$$W = \frac{k_{эм} S_{об}}{q_M} \quad (56)$$

Рабочий ток обмотки  $I$ , А,

$$I = \frac{U_n q_M}{\rho_l l_{ср} W} \quad (57)$$

Уточненное значение магнитодвижущей силы обмотки  $F'$ , А,

$$F' = IW. \quad (58)$$

Расчитанное по (58) значение  $F'$  не должно отличаться от  $F$ , определенной в разд. 5 более чем на 5 %. При несоблюдении этого условия необходимо произвести повторный расчет параметров обмотки и провода.

### 8.3 Тепловой расчет обмотки

Мощность активных потерь в обмотке  $P$ , Вт,

$$P = (F')^2 \frac{\rho_l l_{ср}}{q_M W} \quad (59)$$

Площадь наружной поверхности обмотки  $S_n$ , м<sup>2</sup>,

$$S_n = \pi D_0 l_0. \quad (60)$$

Площадь внутренней поверхности обмотки  $S_{вн}$ , м<sup>2</sup>,

$$S_{вн} = \pi d_0 l_0. \quad (61)$$

Реальная температура нагрева обмотки  $t'_p$ , °С,

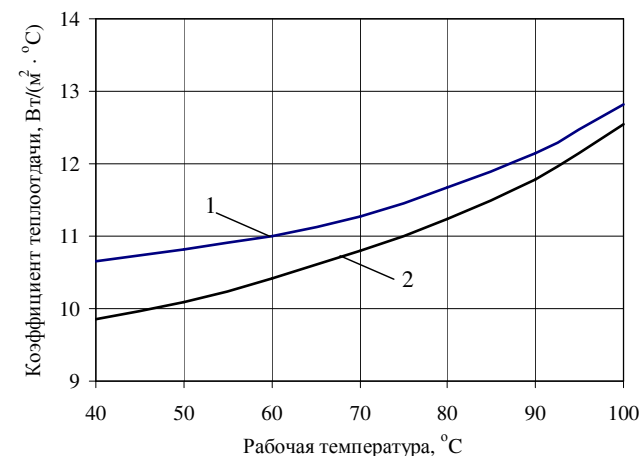
$$t'_p = \frac{P}{\lambda(S_n + \beta S_{вн})} + t_{oc}, \quad (62)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплоотдачи поверхности обмотки, Вт/(м<sup>2</sup>·°С); определяется по рисунку 11;

$\beta$  – коэффициент, характеризующий теплоотдачу с внутренней поверхности обмотки; для обмотки, намотанной на сердечник, принимается равным 2,4, для обмотки на металлической втулке – 1,7, для каркасной и бескаркасной обмоток – 0,9;

$t_{oc}$  – расчетная температура окружающей среды, °С; для подвижного состава городского электрического транспорта принимается равной 40 °С.

Расчитанное по (62) значение  $t'_p$  не должно отличаться от принятой в начале расчета  $t_p$  более чем на 3 °С. При несоблюдении этого условия необходимо произвести повторный расчет, задавшись рабочей температурой  $t_p$ , близкой к значению  $t'_p$ .



1 – для обмотки на стальном сердечнике; 2 – для каркасной и бескаркасной обмоток

Рисунок 11 – Зависимость коэффициента теплоотдачи поверхности обмотки от ее рабочей температуры

### Список литературы

- 1 Макаров, Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35кВ / Е. Ф. Макаров; под ред. И. Т. Горюнова и др. Т. 1. – М.: Папирус Про, 1999. – 608 с.
- 2 Макаров, Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 4. / Е. Ф. Макаров; под ред. И. Т. Горюнова, А. А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2005. – 640 с.
- 3 Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. В. Г. Герасимова и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
- 4 ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84). Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. – Введ. 21.11.93. – 5 с.
- 5 Ефремов, И. С. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование): учеб. пособие для вузов. Ч. 1 / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высш. школа, 1981. – 293 с.
- 6 Ефремов, И. С. Технические средства городского электрического транспорта: учеб. пособие для студ. вузов спец. «Городской электрический транспорт» / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. В. Шевченко. – М.: Высш. шк., 1985. – 448 с.



**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(обязательное)

**Кривые намагничивания сталей**

Данные по кривым намагничивания стали, приведенные в таблице А.1, получены из неофициальных источников и могут использоваться только в учебных целях.

Т а б л и ц а А.1 – **Магнитная индукция**

В теслах

| Марка стали | Напряженность магнитного поля Н, А/мм |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | 0,2                                   | 0,4  | 0,6  | 1,0  | 1,4  | 2,0  | 6,0  | 12,0 | 20,0 |
| 10          | 0,08                                  | 0,26 | 0,46 | 0,78 | 0,99 | 1,19 | 1,59 | 1,76 | 1,85 |
| 20          | 0,72                                  | 0,87 | 0,97 | 1,09 | 1,19 | 1,28 | 1,57 | 1,73 | 1,79 |
| 10832       | 0,29                                  | 0,87 | 1,07 | 1,25 | 1,38 | 1,48 | 1,70 | 1,85 | 1,94 |
| 10848       | 0,59                                  | 1,20 | 1,35 | 1,50 | 1,58 | 1,64 | 1,77 | 1,89 | 1,97 |
| 20824       | 0,12                                  | 0,39 | 0,63 | 0,94 | 1,12 | 1,30 | 1,72 | 1,92 | 2,01 |
| 20836       | 0,15                                  | 0,50 | 0,75 | 1,05 | 1,25 | 1,50 | 1,79 | 1,96 | 2,03 |
| 20848       | 0,41                                  | 0,81 | 0,97 | 1,14 | 1,25 | 1,40 | 1,66 | 1,81 | 1,90 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(обязательное)

**Параметры обмоточных проводов**

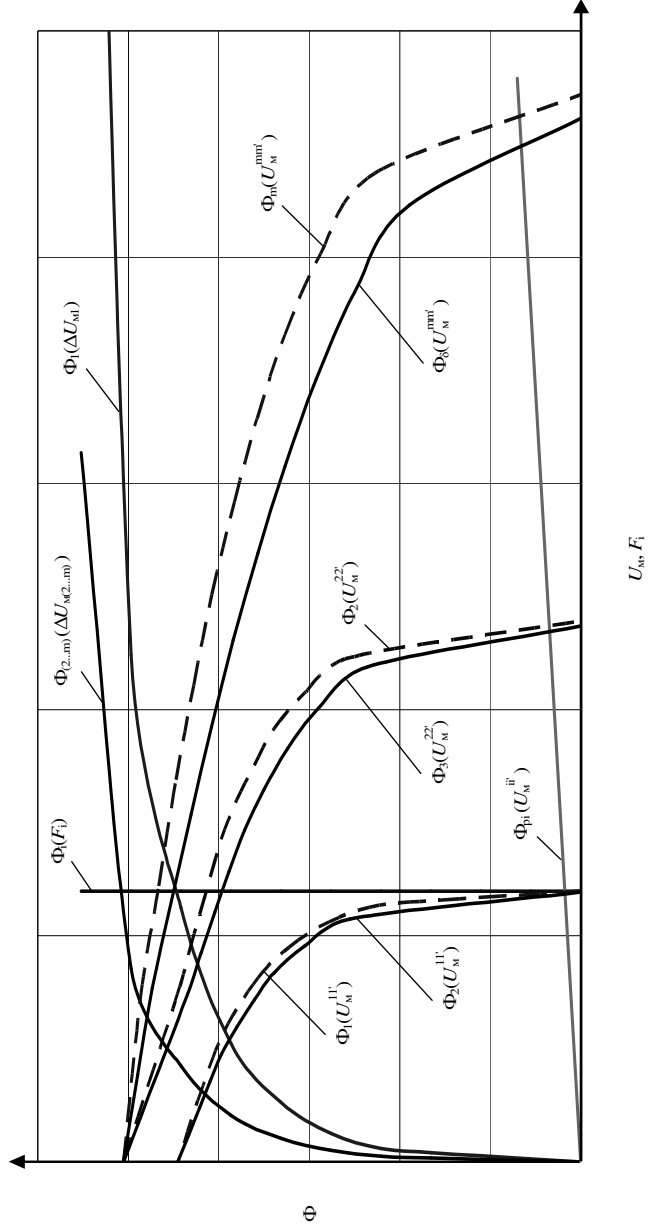
Т а б л и ц а Б.1 – **Диаметр провода**

В миллиметрах

| По меди $d_m$ | С изоляцией для марки провода $d_n$ |       |       |       |
|---------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
|               | ПЭЛ                                 | ПЭВ1  | ПЭВ2  | ПЭТВЛ |
| 0,13          | 0,15                                | 0,155 | 0,16  | 0,156 |
| 0,14          | 0,16                                | 0,165 | 0,17  | 0,165 |
| 0,15          | 0,17                                | 0,18  | 0,19  | 0,18  |
| 0,16          | 0,18                                | 0,19  | 0,2   | 0,19  |
| 0,17          | 0,19                                | 0,2   | 0,21  | 0,2   |
| 0,18          | 0,2                                 | 0,21  | 0,22  | 0,21  |
| 0,19          | 0,21                                | 0,22  | 0,23  | 0,22  |
| 0,20          | 0,22                                | 0,23  | 0,24  | 0,23  |
| 0,21          | 0,235                               | 0,245 | 0,26  | 0,25  |
| 0,23          | 0,255                               | 0,265 | 0,28  | 0,27  |
| 0,25          | 0,275                               | 0,285 | 0,3   | 0,29  |
| 0,27          | 0,295                               | 0,305 | 0,32  | 0,31  |
| 0,29          | 0,32                                | 0,33  | 0,345 | 0,335 |
| 0,31          | 0,34                                | 0,35  | 0,365 | 0,355 |
| 0,33          | 0,36                                | 0,37  | 0,385 | 0,375 |
| 0,35          | 0,38                                | 0,39  | 0,41  | 0,4   |
| 0,38          | 0,41                                | 0,42  | 0,44  | 0,43  |
| 0,41          | 0,445                               | 0,45  | 0,47  | 0,46  |
| 0,44          | 0,475                               | 0,48  | 0,5   | 0,49  |
| 0,47          | 0,505                               | 0,51  | 0,53  | 0,52  |
| 0,49          | 0,525                               | 0,53  | 0,55  | 0,54  |
| 0,51          | 0,55                                | 0,555 | 0,58  | 0,57  |
| 0,53          | 0,57                                | 0,575 | 0,6   | 0,59  |
| 0,55          | 0,59                                | 0,595 | 0,62  | 0,61  |
| 0,57          | 0,61                                | 0,615 | 0,64  | 0,63  |
| 0,59          | 0,64                                | 0,64  | 0,67  | 0,65  |
| 0,62          | 0,67                                | 0,67  | 0,7   | 0,68  |
| 0,64          | 0,69                                | 0,69  | 0,72  | 0,7   |
| 0,67          | 0,72                                | 0,72  | 0,75  | 0,73  |
| 0,69          | 0,74                                | 0,74  | 0,77  | 0,75  |
| 0,72          | 0,77                                | 0,77  | 0,8   | 0,78  |
| 0,74          | 0,8                                 | 0,8   | 0,83  | 0,81  |

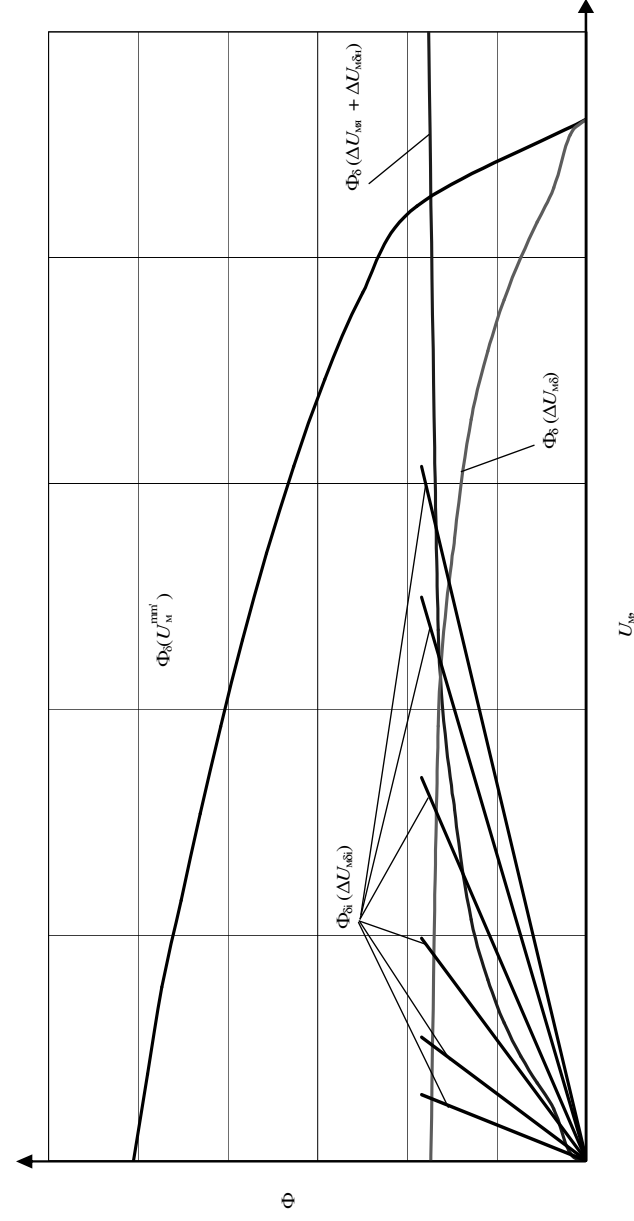
ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(обязательное)

Построение зависимости  $\Phi_{\delta}(U_M^{mm'})$



ПРИЛОЖЕНИЕ Г  
(обязательное)

Построение зависимости  $\Phi_{\delta}(U_{M\delta})$



**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**(обязательное)**

**Бланк задания на курсовой проект**

по дисциплине "Электрическое оборудование электрического транспорта"

Студенту \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

**Разработать конструкцию и рассчитать характеристики аппарата коммутации  
электрических цепей подвижного состава городского электрического транспорта**

**Исходные данные**

- 1 Контактор-прототип \_\_\_\_\_
- 2 Ток коммутируемой цепи \_\_\_\_\_ А
- 3 Номинальное напряжение цепей управления \_\_\_\_\_ В
- 4 Начальное усилие возвращающей пружины \_\_\_\_\_ Н
- 5 Жесткость возвращающей пружины \_\_\_\_\_ Н/мм
- 6 Жесткость контактной пружины \_\_\_\_\_ Н/мм
- 7 Провал контактов \_\_\_\_\_ мм
- 8 Диаметр сердечника электромагнитной катушки \_\_\_\_\_ мм
- 9 Диаметр наконечника сердечника \_\_\_\_\_ мм
- 10 Марка стали магнитопровода \_\_\_\_\_

**Вопросы, подлежащие разработке**

- 1 Разработка эскизного проекта конструкции контактора.
  - 1.1 Выбор типа магнитопровода, кинематической схемы подвижной части и размеров основных элементов.
  - 1.2 Выбор и краткое описание работы элементов дугогашения.
- 2 Расчет и построение механической характеристики.
- 3 Расчет магнитных проводимостей рабочего и нерабочего воздушных зазоров и путей потоков рассеяния.
- 4 Определение магнитодвижущей силы обмотки.
- 5 Расчет характеристик магнитной цепи.
- 6 Построение тяговой характеристики электромагнита.
- 7 Расчет электромагнитной катушки.
  - 7.1 Определение размеров каркаса и параметров обмотки.
  - 7.2 Тепловой расчет обмотки.
- 8 Заключение о работоспособности спроектированного аппарата и возможных направлениях оптимизации его характеристик.

В графической части проекта выполняются эскиз контактора в масштабе с указанием основных размеров, схемы, диаграммы и характеристики, сопровождающие расчеты в пояснительной записке.

Пояснительная записка и графический материал курсового проекта выполняются с обязательным соблюдением стандартов ЕСКД.

**Рекомендуемая литература**

- 1 **Ефремов, И. С.** Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. пособие для студ. вузов по спец. "Городской электрический транспорт" / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высш. школа, 1976. – 479 с.
- 2 **Ефремов, И. С.** Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование): учеб. пособие для студ. вузов по спец. "Городской электрический транспорт". Ч.1. / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высш. школа, 1981. – 293 с.
- 3 **Ефремов, И. С.** Технические средства городского электрического транспорта: учеб. пособие для студ. вузов по спец. "Городской электрический транспорт" / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. В. Шевченко. – М.: Высш. школа, 1985. – 448 с.

Дата выдачи задания " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ г.

Срок сдачи проекта " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ г.

Руководитель курсового проектирования \_\_\_\_\_

Бланк задания составил ассистент И. С. Евдасев. Рассмотрен и одобрен на заседании кафедры " Электрический подвижной состав " 8 ноября 2005 г.

Учебное издание

*ЕВДАСЕВ Игорь Сергеевич*  
*БУХАНЕВИЧ Геннадий Иванович*

**Разработка электромагнитного привода контактора**

Пособие по выполнению курсового проекта  
по дисциплине «Электрическое оборудование электрического транспорта»

Редактор Н. А. Дашкевич  
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 12.01.2006 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага газетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,84. Тираж 100 экз.  
Зак. № \_\_\_\_\_ . Изд. № 4265.

Редакционно-издательский отдел УО «БелГУТ», 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.  
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.

Типография УО «БелГУТ», 246022, г. Гомель, ул. Кирова, 34.  
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.