

**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-

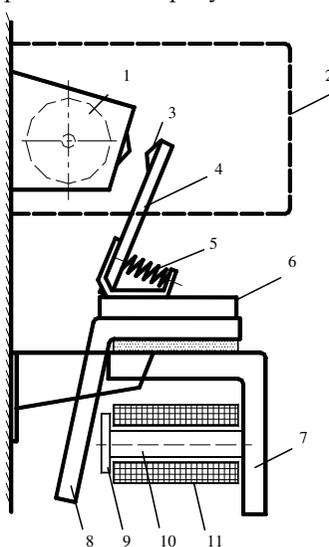
проводящие расчеты в пояснительной записке. Графическая часть выполняется на листах миллиметровой бумаги форматов А4 и А3.

## 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.

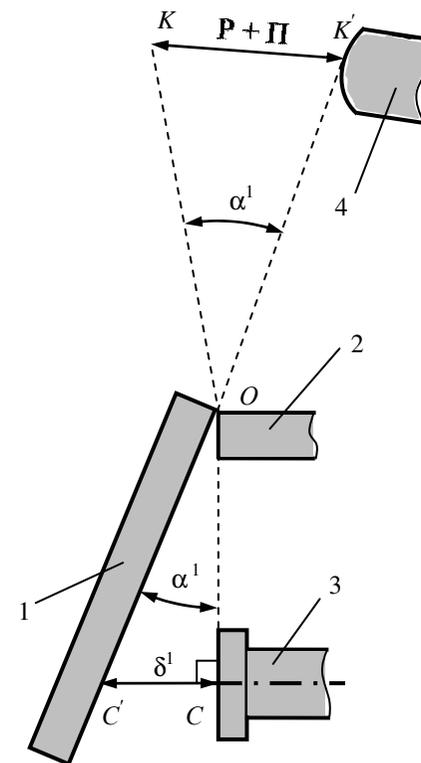


- 1 – дугогасительная катушка; 2 – дугогасительная камера; 3 – подвижный контакт;  
4 – держатель контакта; 5 – притирающая (контактная) пружина; 6 – изолирующая пластина;  
7 – скоба (ядро); 8 – яркорь; 9 – полюсный наконечник сердечника; 10 – сердечник;  
11 – электромагнитная катушка

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;

$\Pi$  – 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  $P_K^{III}$ . 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)

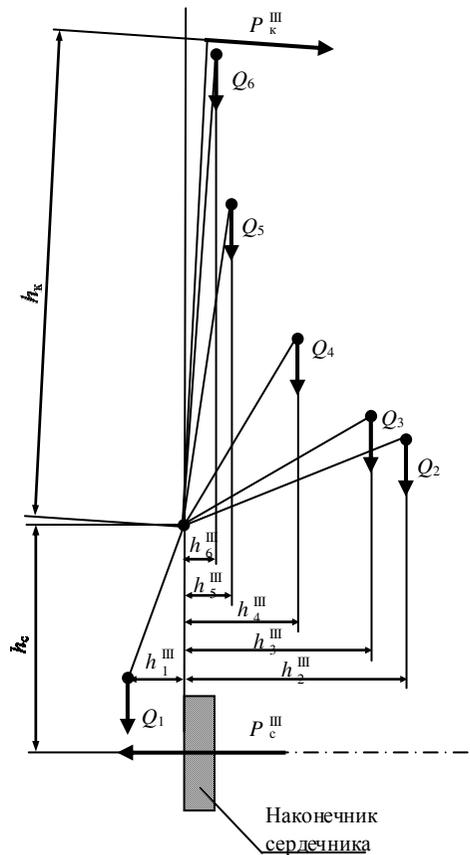
$$\alpha^{I-II} = 2 \arcsin\left(\frac{P}{2 \cdot OK}\right), \quad (4)$$

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;  $h_k$  – плечо действия силы нажатия контактов;  $h_c$  – 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

$$P_{к}^{IV} = \frac{I_n^2}{A_k b}, \quad (6)$$

где  $I_n$  – номинальный ток коммутируемой цепи, А;

$A_k$  – тепловая постоянная контакта,  $A^2/(мм \cdot Н)$ ; при  $I_n < 100$  А принимается равной от 8 до 21  $A^2/(мм \cdot Н)$ , при  $I_n > 100$  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  $R_k$ , Ом, определяется по формуле

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

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала контактов, Ом·Н<sup>m</sup>; 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

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

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:

$$I_{пр} > I_n K_{пэ}, \quad (9)$$

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

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	$\Delta U_{\text{рек}}, \text{мВ}$
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  $\alpha^{\text{I-II}}$  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

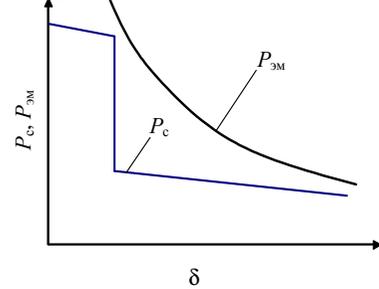


Рисунок 4 – Пример механической и тяговой характеристик контактора

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

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

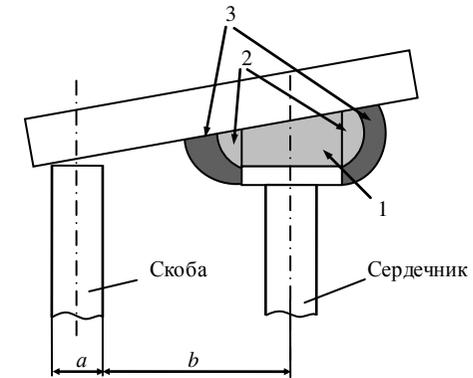
### 4.1 Магнитная проводимость воздушного рабочего зазора

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,

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

- где  $\mu_v$  – относительная магнитная проницаемость воздуха, отн. ед.;  $\mu_v = 1$ ;
- $\mu_0$  – 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,

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

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

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

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 воздушного 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.

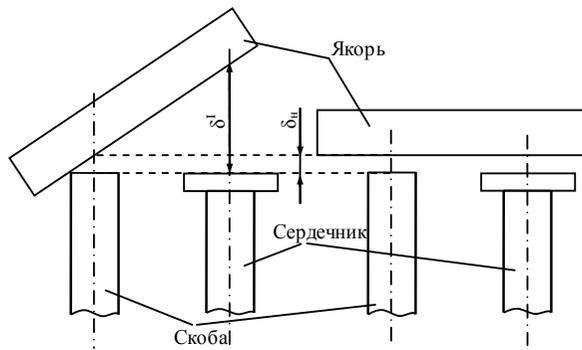
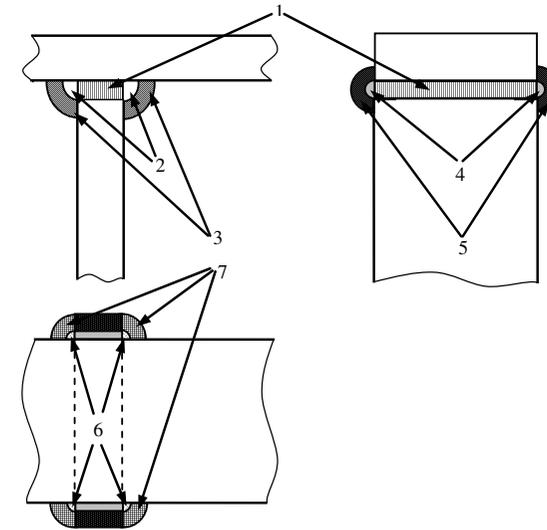


Рисунок 6 – Схема расчета воздушного нерабочего зазора



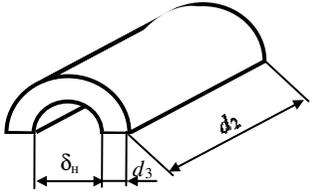
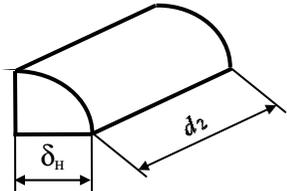
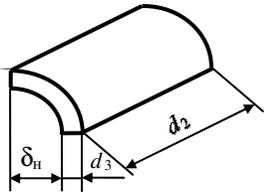
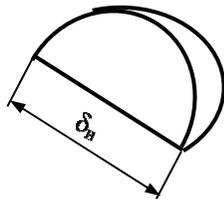
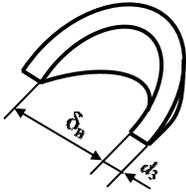
1 – параллелепипед; 2 – четверть цилиндра; 3 – четверть оболочки цилиндра;  
4 – полуцилиндр; 5 – оболочка полуцилиндра; 6 – сферический квадрант;  
7 – оболочка сферического квадранта

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

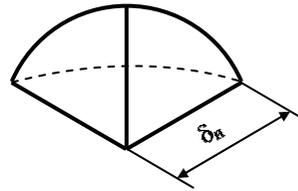
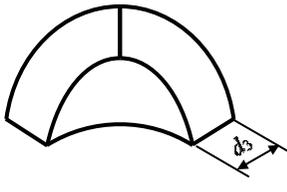
Таблица 4 – Формулы для расчета магнитной проводимости простых фигур

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;

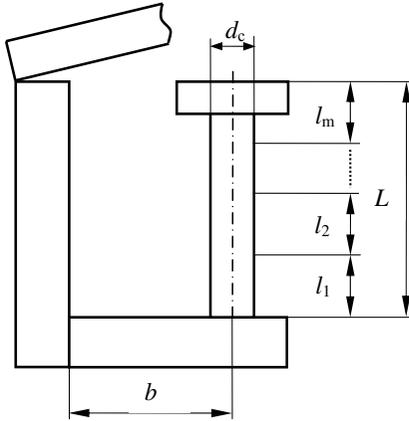
$r_c$  – радиус сердечника, мм.

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,

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

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

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.

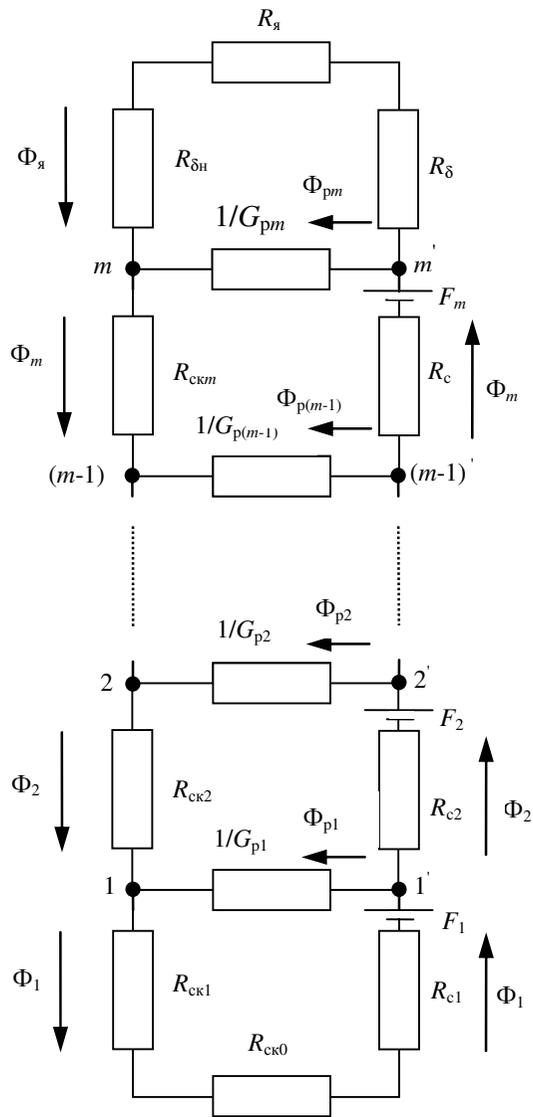


Рисунок 9 – Схема замещения магнитной цепи

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  $\Delta U_{мскоj}$ , А,

$$\Delta U_{мскоj} = H_{скоj} l_{ско}, \quad (32)$$

где  $H_{скоj}$  – 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

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

для участка 2...т

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

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  $\Phi_{\delta n}$  и в якоре  $\Phi_{я}$  одинаковые по значению, тогда падение магнитного напряжения в воздушном нерабочем зазоре  $\Delta U_{м\delta n j}$ , А,

$$\Delta U_{м\delta n j} = \frac{\Phi_{яj}}{G_{\delta n}} \quad (38)$$

Построение суммарной вебер-амперной характеристики якоря и воздушного нерабочего зазора  $\Phi_{я}(\Delta U_{мя} + \Delta U_{м\delta n})$  или  $\Phi_{\delta}(\Delta U_{мя} + \Delta U_{м\delta n})$  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)

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

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.

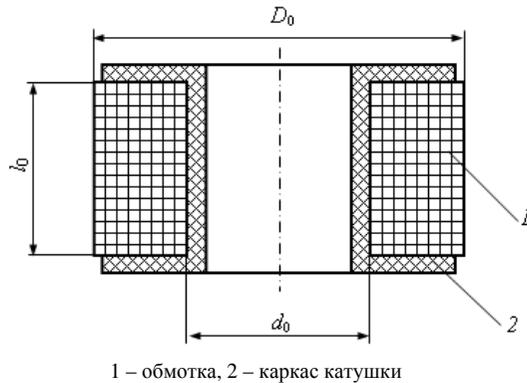


Рисунок 10 – Катушка электромагнита каркасного типа

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  $l_{cp}, \text{м}$ ,

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

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  $\rho_t, \text{Ом}\cdot\text{м}$ ,

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

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  $\alpha = 0,0043 \text{ °С}^{-1}$ ;

$t_p$  – 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,

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

Рассчитанное 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,

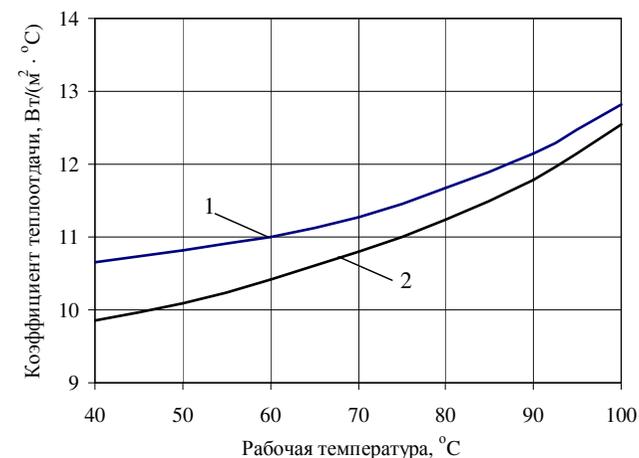
$$t'_p = \frac{P}{\lambda(S_n + \beta S_{вн})} + t_{oc}, \quad (62)$$

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.

Рассчитанное 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**

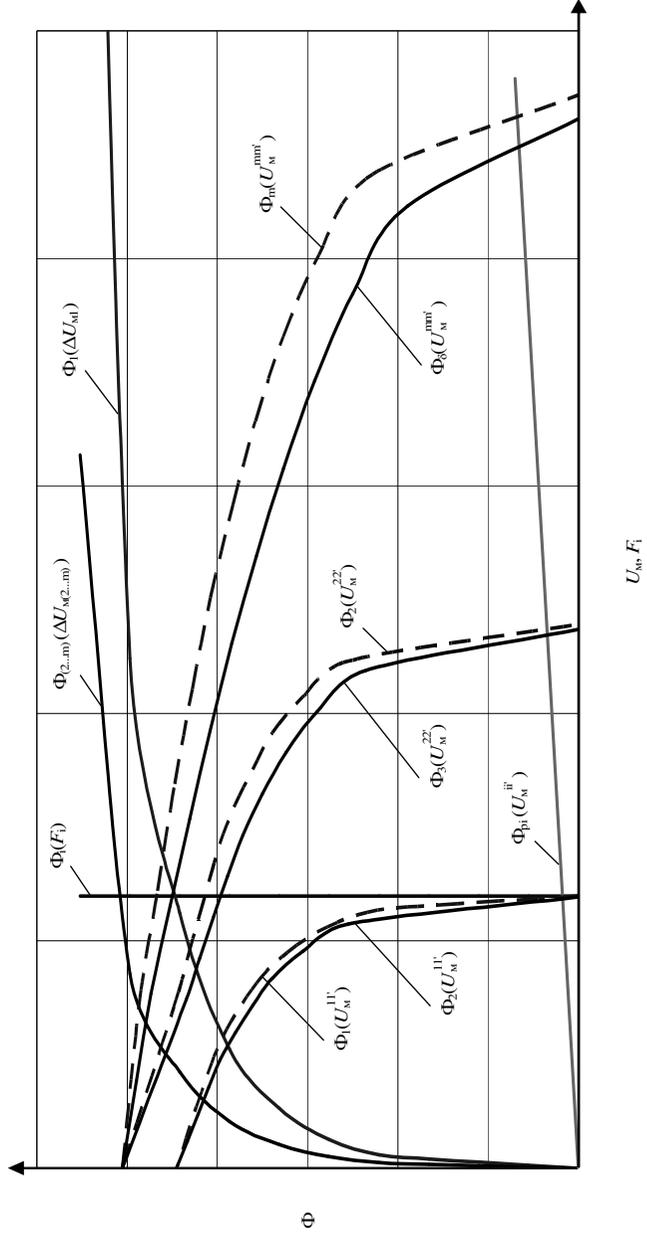
Т а б л и ц а Б.1 – **Диаметр провода**

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

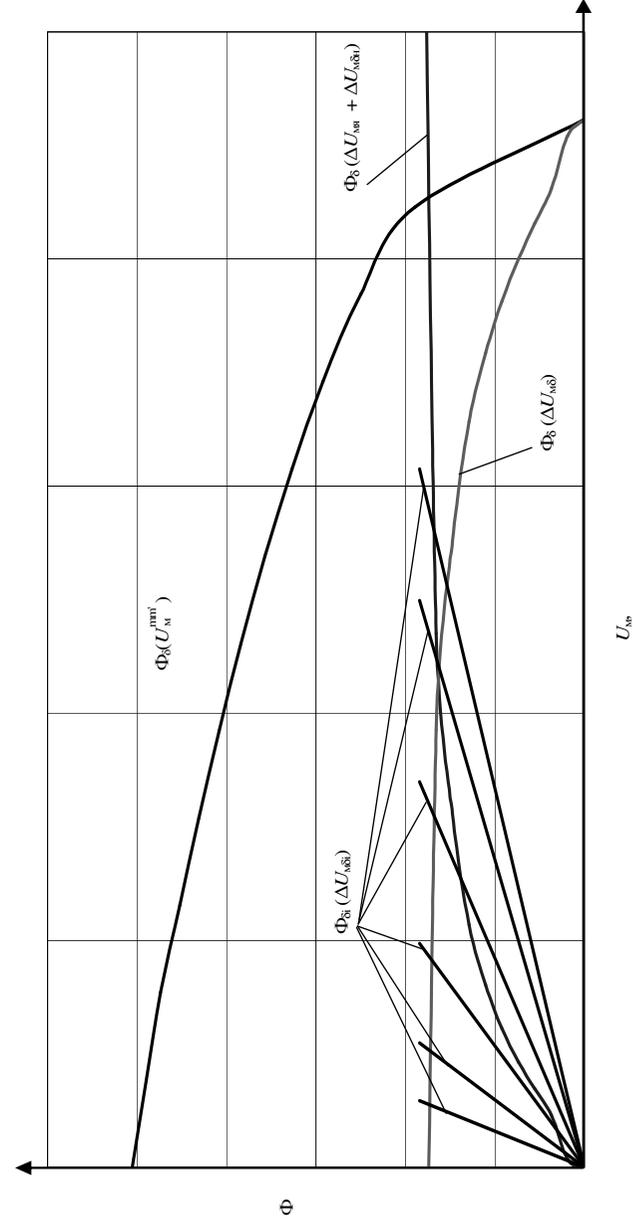
ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(обязательное)

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.