

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**М. С. Харитонов**

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Учебно-методическое пособие  
по выполнению курсового проекта для студентов магистратуры  
по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2022

УДК 621.318

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
И. Е. Кажекин

**Харитонов, М. С.**

Технология проектирования электроустановок: учеб.-метод. пособие – локальный электронный методический материал по выполнению курсового проекта для студентов магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / М. С. Харитонов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 37 с.

В учебно-методическом пособии по выполнению курсового проекта представлены указания по порядку разработки курсового проекта, методики выполнения заданий, требования к структуре, объему, содержанию и оформлению курсового проекта, описание организации защиты курсового проекта и критерии оценивания. Курсовое проектирование предназначено для практического закрепления теоретического материала в области проектирования элементов электроустановок.

Табл. 10, рис. 7, список лит. – 6 наименований

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 30.09.2022 г., протокол № 1

УДК 621.318

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Харитонов М. С., 2022 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	6
2 ЗАДАНИЕ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ.....	7
3 ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	9
4 ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	10
5 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....	11
6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ..	13
6.1 Предварительный расчет ядра электромагнита постоянного тока .....	15
6.2 Разработка конструкции электромагнита постоянного тока .....	19
6.3 Проектный расчет основных параметров электромагнита.....	24
6.4 Выводы по результатам расчета .....	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	32
Приложение 1 .....	33
Приложение 2 .....	34
Приложение 3 .....	35
Приложение 4 .....	36

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по теме «Проектирование электромагнита постоянного тока» является составным элементом модуля «Технология проектирования электроустановок» программы магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Целью курсового проекта является практическое применение студентами теоретических знаний, полученных при изучении модуля «Технология проектирования электроустановок» в части фундаментальных основ и технических особенностей технологических процессов, применяемых при производстве электрического оборудования, и основных методов и подходов, применяемых при проектировании электрического оборудования и электроустановок.

Задачами курсового проектирования являются:

- получение навыков проектирования электромагнитов постоянного тока;
- выработка навыков творческого мышления и умения применять обоснованные в технико-экономическом отношении решения инженерных задач, воспитание ответственности за качество принятых решений;
- развитие способности применять знания физических законов, законов электромагнитного поля, при решении задач профессиональной деятельности;
- формирование понимания инновационно-технологических рисков при внедрении новой техники и технологий профессиональных навыков, связанных с самостоятельной деятельностью будущего специалиста;
- самостоятельное выполнение расчетов по обоснованию и оптимизации режимов работы объектов профессиональной деятельности.

После выполнения и защиты курсового проекта студент должен:

*знать:*

- основные понятия теории электромагнитного поля и законы электрических и магнитных цепей
- основные типы, назначение, особенности практического применения элементов электроустановок и принципы их сопряжения и совместного функционирования;
- основные особенности, преимущества и возможные риски современных технологий производства электрического оборудования;

*уметь:*

- проводить расчеты электромагнитных величин;
- использовать основные понятия электромагнетизма и теории электрических цепей;
- составлять схемы для электромагнитных цепей;

- осуществлять и обосновывать выбор технологических решений по производству электрического оборудования с учетом особенностей производственных процессов и возможных рисков;

- применять расчетные методики для проектирования и оптимизации режимов работы электроустановок;

- производить обоснование принятия проектных решений на основе анализа технических и режимных показателей;

*владеть:*

- навыками анализа электромагнитных полей;

- навыками исследования электротехнических устройств с использованием понятий электромагнитного поля;

- методами расчета параметров технологических процессов изготовления электрического оборудования по заданным характеристикам;

- современными программными средствами проектирования электроустановок, расчета и оптимизации их режимов работы.

## 1 СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Пояснительная записка к курсовому проекту должна включать следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект;
- содержание;
- введение;
- основная часть с разбивкой по разделам;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

### *Титульный лист*

Форма титульного листа и образец его заполнения приведены в Приложении 4.

### *Техническое задание*

Курсовой проект должен выполняться на основе индивидуального задания, содержащего исходные параметры по типу электромагнита, величине критического зазора, значениям критической силы и напряжения сети.

### *Содержание*

Содержание должно отражать все разделы, включённые в пояснительную записку с указанием страниц записки, на которых они начинаются.

### *Введение*

В разделе «Введение» кратко формулируются цель и задачи курсового проекта, указываются особенности, техническое и практическое значение, основные направления предлагаемых решений. Во введении следует раскрыть актуальность вопросов темы, охарактеризовать проблему, к которой относится тема, перечислить методы и средства, с помощью которых будут решаться поставленные задачи.

### *Основная часть*

Основная (расчетная) часть работы включает следующие вопросы:

- 1) Определение основных размеров электромагнита;
- 2) Расчёт обмоточных данных катушки;
- 3) Разработка чертежа электромагнита;
- 4) Определение максимальной температуры катушки электромагнита;
- 5) Оценка потребляемой мощности в рабочем режиме.

### *Заключение*

В заключении сообщаются основные результаты выполненной работы, рекомендации по использованию результатов работы.

### *Список использованных источников*

В список использованных источников включаются непосредственно использованные источники, на которые имеется ссылки в текстовом документе. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте.

### *Приложения*

В приложения следует включать материалы вспомогательного характера. В приложения могут быть помещены:

- таблицы и рисунки большого формата;
- дополнительные расчеты.

## 2 ЗАДАНИЕ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Задание по курсовому проекту включает данные по типу электромагнита, величине критического зазора, значениям критической силы и напряжения сети. Исходные данные для проектирования выбираются по указанию преподавателя. В таблице 2.1 представлены примерные варианты исходных данных. Эскизы предлагаемых к разработке электромагнитов приведены на рис. 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для выполнения курсового проекта

Варианты исходных данных	Тип электромагнита	Критический зазор, см	Критическая сила, кг	Напряжение сети постоянного тока, В
		$\delta_0$	$F_0$	$U$
1	Прямоходовой	1,0	4,5	220
2	Поворотный	1,2	6,5	220
3	Прямоходовой	1,5	5,0	110
4	Поворотный	1,5	5,0	110
5	Прямоходовой	1,3	6,0	75
6	Поворотный	1,3	6,0	75
7	Прямоходовой	0,8	7,0	45
8	Поворотный	0,8	7,0	45
9	Прямоходовой	1,0	6,0	85
10	Поворотный	1,0	6,0	85
11	Прямоходовой	1,3	5,0	110
12	Поворотный	1,3	5,0	110
13	Прямоходовой	1,5	4,0	220
14	Поворотный	1,5	4,0	220
15	Прямоходовой	0,8	4,5	110
16	Поворотный	0,8	4,5	110
17	Прямоходовой	1,0	5,0	95
18	Поворотный	1,0	5,0	95
19	Прямоходовой	1,3	5,5	48

20	Поворотный	1,3	5,5	48
21	Прямоходовой	1,5	6,5	60
22	Поворотный	1,5	6,5	60
23	Прямоходовой	1,3	7,0	50
24	Поворотный	1,0	4,5	110
25	Прямоходовой	1,2	6,5	210
26	Поворотный	1,5	4,0	110
27	Прямоходовой	1,5	4,0	110
28	Поворотный	0,8	4,5	220
29	Прямоходовой	0,8	4,5	220
30	Поворотный	1,3	5,5	110
31	Прямоходовой	1,3	5,5	48
32	Поворотный	1,3	5,5	48
33	Прямоходовой	1,0	5,0	85
34	Поворотный	1,0	5,0	85
35	Прямоходовой	1,5	6,5	48
36	Поворотный	1,5	6,5	48
37	Прямоходовой	1,3	7,0	60
38	Поворотный	1,3	7,0	60
39	Прямоходовой	1,3	6,5	50
40	Пов	1,3	6,5	50

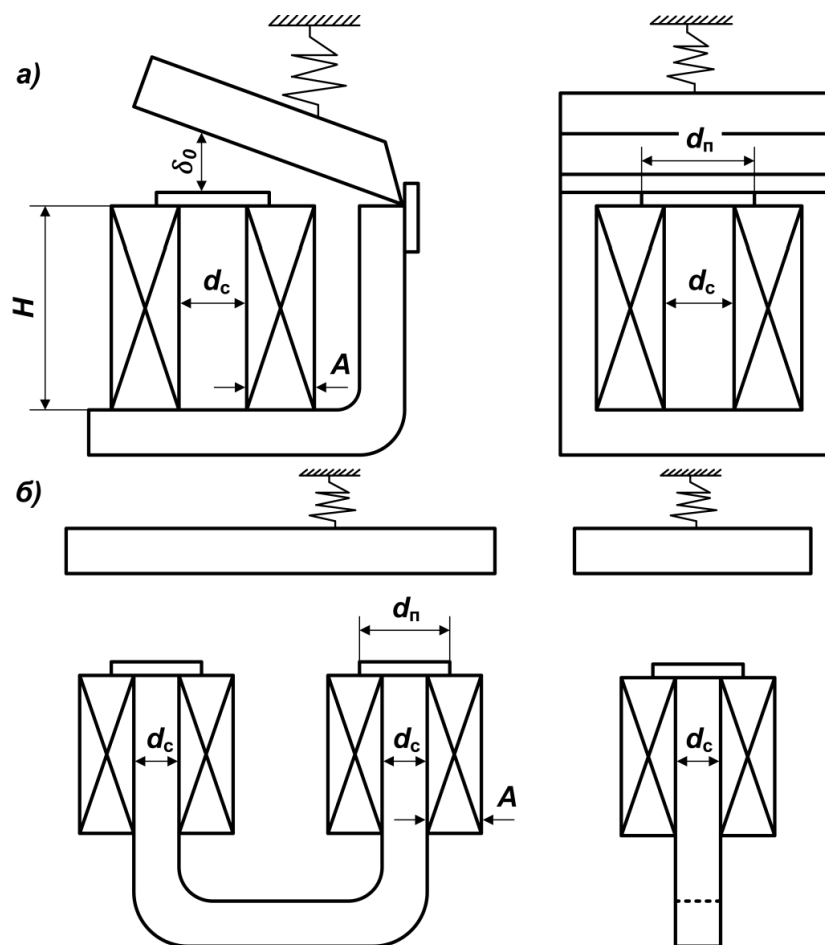


Рисунок 2.1 – Эскизы электромагнитов: поворотного (а); прямоходовой (б)



### 3 ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект по указанию преподавателя допускается выполнять и оформлять в редакторе MS Word или в программном комплексе Mathcad. При необходимости допускается использование MS Excel для проведения расчётов. Требования по оформлению курсового проекта различаются в зависимости от используемого программного средства.

#### *Общие требования*

Пояснительная записка должна содержать обязательные структурные элементы (раздел 1). Текстовая часть пояснительной записки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание по середине). Ссылки на литературу оформляются в [скобках]. Нумерация источников – сквозная по первому упоминанию. Электрические схемы рекомендуется выполнять в редакторе MS Visio.

#### *Требования при оформлении в MS Word*

При оформлении в редакторе MS Word необходимо придерживаться следующих основных требований:

- Поля документа: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 15 мм
- Шрифт Times New Roman, размер 12 - 14
- Выравнивание шрифта по ширине
- Расстановка переносов – автоматическая
- Межстрочный интервал – 1,15 - 1,25
- Отступ первой строки абзаца – 12,5 мм
- Выравнивание рисунков – по центру без отступа
- Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа
- Подписи рисунков и таблиц – по ГОСТ
- Нумерация страниц – по центру внизу страницы.

#### *Требования при оформлении в Mathcad*

В случае выполнения расчетов в среде Mathcad допускается оформлять расчетную часть курсового проекта встроенными средствами редактирования. По завершению работы осуществляется вывод электронного документа в формате pdf. Перед началом работы необходимо настроить поля документа: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 15 мм (рисунок 3.1).

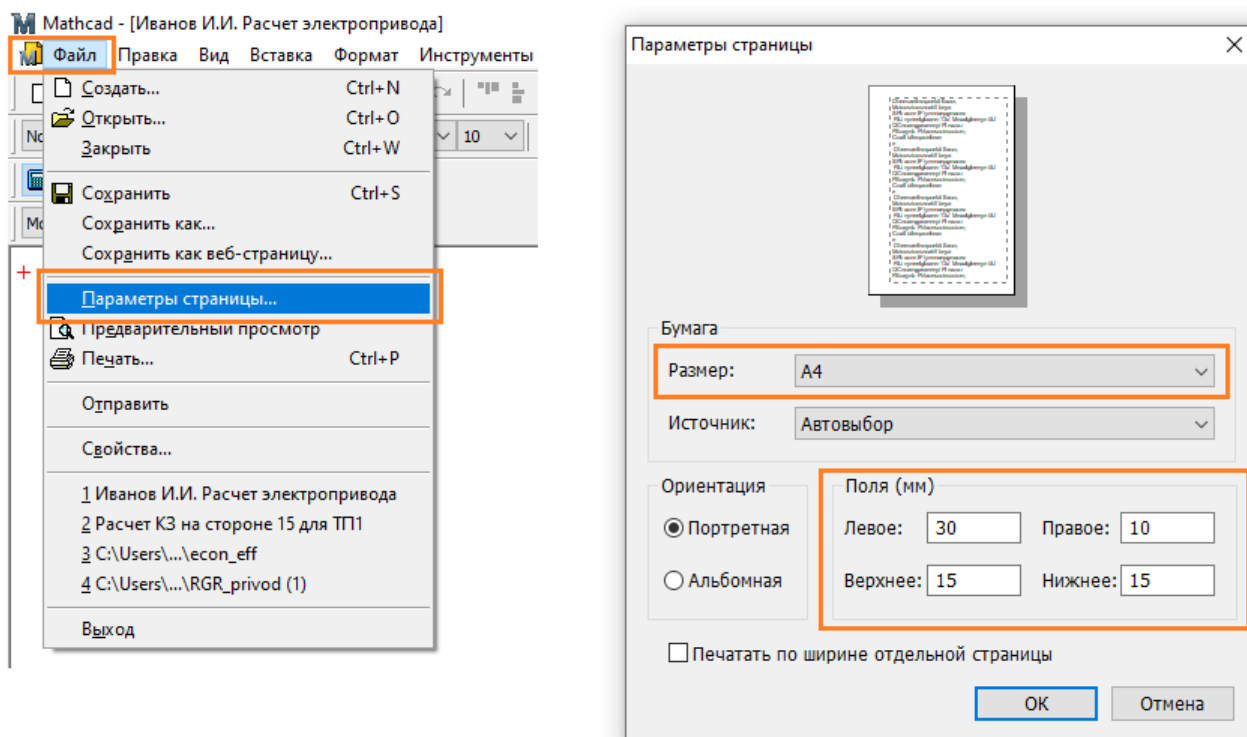


Рисунок 3.1 – Задание полей документа в программе Mathcad

Расчетная часть должна иметь четкую структуру. Таблицы и рисунки должны иметь названия. При построении диаграмм необходимо вручную задавать шаг сетки по осям диаграммы с целью обеспечения удобства считывания данных. Шаг подбирается под каждую диаграмму индивидуально в зависимости от диапазона значений по оси из числа типовых: (10, 20, 30, ...), (20, 40, 50, ...), (25, 50, 75, ...), (50, 100, 150, ...), (100, 200, 300, ...). Изменение шага осуществляется через меню «Формат» редактируемой диаграммы в разделе «Количество сеток».

#### 4 ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Защита курсового проекта проводится после предоставления завершенной работы и устранения всех замечаний по расчетной части. Защита проводится устно в формате собеседования по материалам работы и в форме ответа на контрольные вопросы. Общее количество вопросов зависит от качества ответов студента и уровня владения материалом представленной работы.

Типовые контрольные вопросы:

1. Приведите схему расчета магнитной цепи постоянного сечения с зазором. Почему при приближенных расчетах магнитных цепей можно пренебречь магнитным сопротивлением стали?
2. Как зависит величина магнитного потока в рабочем зазоре и величина

тока в катушке электромагнита постоянного тока от величины рабочего зазора?

3. Чем отличается работа электромагнита переменного тока от работы электромагнита постоянного тока? Для чего в электромагнитах переменного тока применяют короткозамкнутый виток?

4. Как связана величина магнитного потока в электромагните переменного тока с величиной приложенного напряжения?

5. Как зависит величина магнитного потока в рабочем зазоре и величина тока в катушке электромагнита переменного тока от величины рабочего зазора?

6. Что представляют собой статическая и динамическая тяговые характеристики электромагнита? Чем они отличаются?

7. Какое должно быть соотношение между тяговой характеристикой электромагнита и механической характеристикой аппарата?

8. Какие способы применяются для ускорения действия электромагнитов? Каким образом можно замедлить их действие?

9. Какие параметры определяются при расчете обмотки электромагнита?

10. Как распределяются магнитные потоки во втяжном электромагните?

11. Напишите формулу для электромагнитной силы с учетом потоков рассеяния. Каково относительное влияние на величину силы каждого из слагаемых при больших и малых зазорах?

12. Какие конструктивные меры используются для регулирования формы тяговых характеристик электромагнитов постоянного тока?

13. Что такое статическая электромагнитная сила?

## 5 КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Критерии оценивания различаются для расчетной части и устных ответов при защите курсового проекта. По результатам выполнения расчетной части и последующей защиты проекта выставляется оценка по пятибалльной системе.

Таблица 5.1 - Критерии оценивания расчетных заданий по пятибалльной системе

Оценка	Критерий
«Отлично»	Методика и порядок расчета верные. Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки.
«Хорошо»	Методика и порядок расчета верные. Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчетах, которые не привели к существенному искажению результата.
«Удовлетворительно»	Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчетах или выборе коэффициентов, обусловленные неполным пониманием принципа расчета, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения.
«Неудовлетворительно»	Применена неверная методология, нарушен порядок расчета, имеется серьезная системная ошибка, обусловленные непониманием принципа расчета и приведшие к ошибочному результату.

Таблица 5.2 - Критерии оценивания устных ответов

Оценка по критериям	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно- корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полной системой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

## 6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

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

Конструкция ЭМ в основном определяется требованием создания необходимой электромагнитной силы при определенных условиях нагрева и охлаждения катушки, т.е. зависит от размеров магнитопровода, наличия рабочих и нерабочих зазоров, размеров и обмоточных данных катушки. Остальные элементы конструкций в меньшей степени влияют на работу ЭМ. Поэтому целесообразно ввести некоторые характерные для принятой методики расчета понятия:

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

Предлагаемая методика предполагает три этапа расчета ЭМ:

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

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

3. Проектный расчет ЭМ, предусматривающий окончательное уточнение полученных в предварительном расчете параметров,

геометрических размеров, обмоточных данных. Оценка соответствия температурных и энергетических параметров существующим нормам.

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

В результате должен быть установлен зазор по ходу якоря, при котором электромагниту приходится развивать наибольшую работоспособность для преодоления противодействующей силы ( $F_{\Pi}$ ).

Такой зазор в дальнейшем принято называть критическим ( $\delta_0$ ), а соответствующую электромагнитную силу – критической силой ( $F_0$ ). Для обеспечения надежной работы критическая сила должна несколько превышать соответствующую этому зазору противодействующую силу:

$$F_0 = K \cdot F_{\Pi},$$

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

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

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

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

В процессе разработки электромагнита необходимо выполнить следующий объем расчетов:

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

## 6.1 Предварительный расчет ядра электромагнита постоянного тока

### 6.1.1 Выбор параметров и безразмерных коэффициентов

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

а) принять исполнение катушки, класс ее изоляции и в соответствии с этим допустимое превышение температуры катушки относительно окружающей среды (Приложение 1):

$$\theta_g = \text{°C};$$

б) при нормированной температуре окружающей среды:

$$\nu_g = \theta_g + 35 \text{ °C}.$$

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

а) коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности катушки, Вт/(град · см<sup>2</sup>):

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

б) удельное сопротивление провода нагретой катушки, Ом · мм<sup>2</sup> / м:

$$\rho = \rho_g = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \nu_g),$$

где  $\rho_0 = 0,0162$  Ом · мм<sup>2</sup> / м – удельное сопротивление медного провода при 0 °C;  $\alpha_0 = 0,00393$  1 / град – температурный коэффициент; в) коэффициент теплообмена с внутренней поверхностью катушки:

$$h_B = \alpha \cdot h,$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий теплообмен между внутренней поверхностью катушки и сердечником, и зависящий от исполнения катушки ( $\alpha = 0,9$  – для бескаркасной, бандажированной катушки,  $\alpha = 1,7$  – для катушки, намотанной на трубу,  $\alpha = 2,7$  – для катушки, намотанной на сердечник,  $\alpha = 0$  – для катушек, имеющих изоляционный каркас, плохо проводящий тепло).

Используя накопленный опыт проектирования, принимаем значения безразмерных конструктивных коэффициентов с учетом наличия на сердечнике полюсного наконечника по таблице 6.1, где

$$n = \frac{A}{d_c} \quad \tau = \frac{d_{\Pi}}{d_c} \quad \beta = \frac{m}{n} \quad m = \beta \cdot n.$$

Таблица 6.1 - Рекомендуемые значения конструктивных коэффициентов

Исполнение ЭМ параметр	Постоянный ток		Переменный ток
	Без полюсного наконечника	С полюсным наконечником	
$n$	0,4 – 0,6	0,7 – 0,8	0,5 – 0,8
$\beta$	2,0 – 8,0	4,0 – 7,0	2,0 – 4,0
$\tau$	1,0	1,6 – 2,0	0,8 – 2,0

Принимаем предварительное заполнение окна катушки проводом:

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

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

Задаемся возможным снижением напряжения в сети  $x = 0,85$ . Задаемся возможным уменьшением магнитного потенциала в стали и в нерабочих зазорах (снижение МДС). В рационально построенных конструкциях падения МДС в стали магнитопровода составляет  $(10 \div 20)\%$ , а в нерабочих воздушных зазорах  $(5 \div 10)\%$  от величины полной МДС катушки  $(I \cdot W)$ :

$$\varphi = \frac{I \cdot W_0}{I \cdot W} = (0,85 \div 0,7),$$

где  $(I \cdot W_0)$  – МДС, приходящаяся на основной рабочий зазор.

### 6.1.2 Расчет ядра электромагнита

Приближенное значение индукции в воздушном зазоре можно получить, используя безразмерные конструктивные коэффициенты:

А) для прямоходового ЭМ:

$$B_0 = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\tau \cdot \sqrt[5]{C_1}} \cdot \sqrt[10]{\frac{(2 \cdot F_0)^3}{\delta_0^4}}.$$

Б) для поворотного ЭМ:

$$B_0 = \frac{4,8 \cdot 10^{-5}}{\tau \cdot \sqrt[5]{C_1}} \cdot \sqrt[10]{\frac{F_0^3}{\delta_0^4}},$$

где  $C_1$  - постоянная и определяется по формуле

$$C_1 = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot p_g \cdot (1 + n)}{\varphi^2 \cdot x^2 \cdot f_3 \cdot \tau^2 \cdot m^2 \cdot n \cdot (1 + 2 + n + a) \cdot h \cdot \theta_g}.$$



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

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

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

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

Определяющий размер ядра электромагнитного элемента  $d_c$  (диаметр сердечника) можно найти из зависимости:

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

$$\frac{F_0}{\delta_0^3} = f(\chi).$$

Результаты расчета сводим в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – К расчету параметров электромагнита

$\chi$	$\chi^2$	$\chi^3$	$\chi^5$	$\varepsilon^2$	$F_0 / \delta^3$	Примечание
1						
2						

По расчетным данным построим зависимость и на полученной кривой, интерполируя, найдем значение  $\chi$ , соответствующее заданной величине  $F_0$ , что позволяет получить определяющий размер ядра электромагнита  $d_c$ , см:

$$d_c = \delta_0 \cdot \chi.$$

### 6.1.3 Основные параметры ядра электромагнита

Габариты ядра ЭМ:

– ширина катушки:

$$A = n \cdot d_c;$$

– высота катушки:

$$H = m \cdot d_c;$$

– диаметр полюсного наконечника:

$$d_{\Pi} = \tau \cdot d_c.$$

Предварительные параметры катушки:

– необходимая МДС,  $A \cdot B$ :

А) для прямоходового электромагнита:

$$(I \cdot W) = \frac{9 \cdot 10^3}{\varphi \cdot x \cdot \tau} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{d_c}{C_1}};$$

Б) для поворотного электромагнита:

$$(I \cdot W) = \frac{4,5 \cdot 10^3}{\varphi \cdot x \cdot \tau} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{d_c}{C_1}};$$

– сечение провода обмотки (расчетное), см<sup>2</sup>:

А) для прямоходового электромагнита:

$$S_M = \frac{2,82 \cdot p_g \cdot (1+n)}{U \cdot \varphi \cdot x \cdot \tau} \cdot d_c^2 \cdot \sqrt{\frac{d_c}{C_1}};$$

Б) для поворотного электромагнита:

$$S_M = \frac{1,41 \cdot p_g \cdot (1+n)}{U \cdot \varphi \cdot x \cdot \tau} \cdot d_c^2 \cdot \sqrt{\frac{d_c}{C_1}};$$

– диаметр провода (расчетный), см:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_M}{\pi}}.$$

Выбираем ближайший размер провода марки ПЭЛ (Приложение 2), а именно: диаметр по меди  $d$ , (мм) (фактический), диаметр по изоляции  $d_1$ , (мм) (фактический), сечение по меди  $S_M$ , (см<sup>2</sup>) (фактическое);

– число витков:

А) для прямоходового электромагнита на две катушки:

$$W = \frac{2 \cdot f_3 \cdot A \cdot H}{S_M};$$

Б) для поворотного электромагнита:

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

Результаты предварительного расчета следует свести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Результаты предварительного расчета электромагнита

Основные расчетные параметры	Единица измерения	Значения
Критическая сила, $F_0$	кг	
Критический зазор, $\delta_0$	см	
Определяющий размер ядра, $d_c$	см	
Индукция в зазоре, $B_0$	Вб/см <sup>2</sup>	
Коэффициент $n$		
Коэффициент $\beta$		
Коэффициент $\tau$		
Коэффициент $m$		
Диаметр полюсного наконечника, $d_{\Pi}$	см	
Магнитодвижущая сила, МДС	А · В	
Сечение провода, $S_M$	мм <sup>2</sup>	
Диаметр провода, $d$	мм	
Число витков	ВИТКИ	
Ширина катушки, $A$	см	
Высота катушки, $H$	см	

## 6.2 Разработка конструкции электромагнита постоянного тока

### 6.2.1 Рабочий эскиз электромагнита

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

Исходными данными проектного расчета являются результаты предварительного расчета ЭМ:

- критическая сила  $F = F_0$ , (кг) и критический зазор  $\delta_0$ ;
- полученные в предварительном расчете определяющий размер ЭМ  $d_c$ , (см), сечение металла провода  $S_M$ , (см<sup>2</sup>) и МДС (катушек)  $I \cdot W$ , (А · В);
- принятые значения безразмерных коэффициентов  $m$ ,  $n$ ,  $\tau$ ,  $\beta$ , определяющие габариты электромагнита. Скорректированные в проектном расчете размеры ЭМ необходимо снабжать индексом штрих:  $d'$ ,  $A'$ ; и т. д.

Один из вариантов эскиза электромагнита приведен на рисунке 6.2.

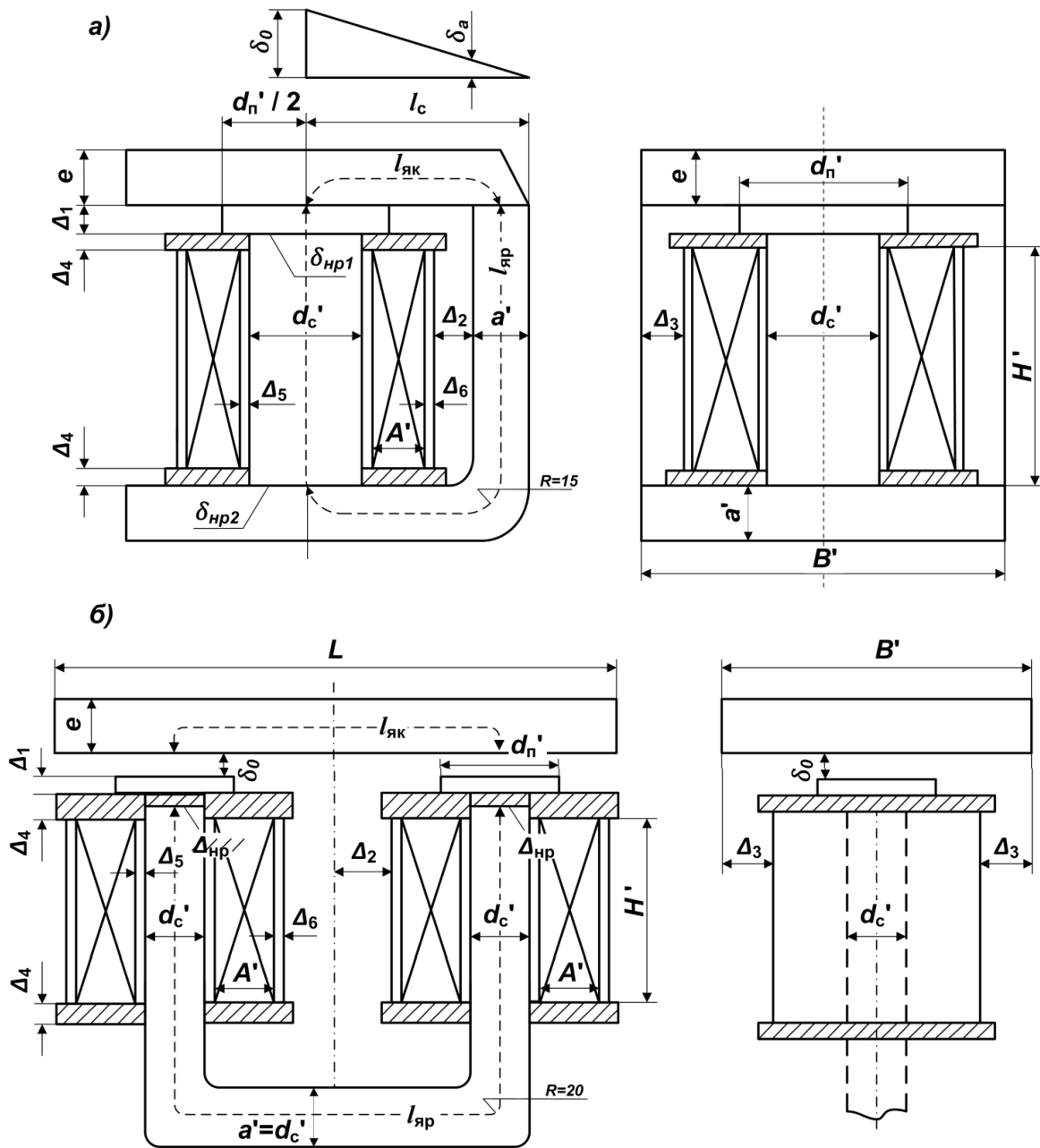


Рисунок 6.2 – Рабочий эскиз электромагнита:  
 а – с поворотным ярком; б – с прямоходовым ярком

### 6.2.2 Уточнение геометрических размеров электромагнита.

Учитывая имеющийся опыт проектирования электромагнитных устройств, применяется следующий порядок дальнейшего расчета:

- уточняем размеры  $d_c$ , исходя из соображения округления полученного ранее размера до конструктивного размера или имеющегося сортамента материала  $d'$ , см;

- принимаем конструктивно размеры высоты полюсного наконечника  $\Delta_1$  и расстояние от скобы магнитопровода до катушки (или половины расстояния между катушками)  $\Delta_2$ , которое определяется удобством замены катушки, но не менее  $(5 \div 10)$  мм,  $\Delta_1 = \text{см}$ ,  $\Delta_2 = \text{см}$ ;

– уточняем размеры катушки:

А) высоту обмотки, см:

$$H' = m \cdot d'_c;$$

Б) высоту катушки, см:

$$H'_k = H' + 2 \cdot \Delta_4,$$

где  $\Delta_4 = (1,5 \div 2,5)$  мм – толщина изоляции шайбы;

В) ширину намотки, см:

$$A' = n \cdot d'_c;$$

Г) ширину катушки, см:

$$A'_k = A' + \Delta_5 \cdot \Delta_6.$$

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

- Определяем диаметр полюсного наконечника, см:

$$d'_n = \tau \cdot d'_c.$$

- Определяем наружный диаметр катушки, см:

$$D'_n = d'_c + 2 \cdot A'_k.$$

- Определяем внутренний диаметр катушки, см:

$$D'_B = d'_c.$$

По полученным размерам и исполнению катушки определяем ее поверхность (П) охлаждения с учетом возможного различия теплоотдачи на ее участках (П<sub>бН</sub>, П<sub>бВ</sub>, П<sub>Т</sub>):

– боковая наружная поверхность, см<sup>2</sup>:

$$П_{бН} = \pi \cdot D' \cdot H';$$

– боковая внутренняя поверхность, см<sup>2</sup>:

$$П_{бВ} = \pi \cdot D' \cdot H';$$

– торцевая поверхность, см<sup>2</sup>:

$$П_T = 2 \cdot (D' - D'_B) \cdot l,$$

где  $l_B = \frac{\pi \cdot (D'_n + D'_B)}{2}$  – длина среднего витка.

### 6.2.3 Определение конструктивных параметров магнитопровода электромагнита

Ширина магнитопровода  $B'$  (якоря) не должна значительно превышать наружный диаметр катушек:

$$B' = D'_H + 2 \cdot \Delta_3,$$

где  $\Delta_3 = (2 \div 5)$  мм.

Сечение скобы магнитопровода  $S_a$  (поворотный ЭМ) во избежание насыщения не должно быть меньше сечения сердечника,  $\text{см}^2$ :

$$S_a \geq S'_c = \frac{\pi \cdot (d'_c)^2}{4}.$$

Толщина скобы магнитопровода  $a'$  должно быть больше  $a' \geq S_a / B'$  см, но не меньше 4 мм.

Сечение якоря магнитопровода может быть принято несколько меньше эквивалентного сечения основного зазора,  $\text{см}^2$ :

$$S_a \geq S'_c = \frac{\pi \cdot (d'_c)^2}{4}.$$

Толщина скобы магнитопровода  $a'$  должно быть больше  $a' \geq S_a / B'$  см, но не меньше 4 мм.

Сечение якоря магнитопровода может быть принято несколько меньше эквивалентного сечения основного зазора,  $\text{см}^2$ :

$$S_{\text{як}} = (0,7 \div 10) \cdot S'_{\text{пэ}},$$

где  $S'_{\text{пэ}} = \frac{\pi \cdot (d'_c)^2 \cdot \tau^2}{4}$  – эквивалентное сечение полюсного наконечника.

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

$$e = \frac{S_{\text{як}}}{B'}$$

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

Высота сердечника  $H'_c$  определяется высотой катушки  $H'_k$ . При отсутствии полюсного наконечника выступающий конец сердечника принимают равным  $\Delta = (4 \div 6)$  мм

По принятым размерам магнитопровода определяют среднюю длину силовых линий якоря  $l_{\text{як}}$  и ярма  $l_{\text{яр}}$ :

$$l_{\text{як}} = l_c - \frac{a'}{2} + e;$$

$$l_{\text{яр}} = H'_k + \Delta_1 + \frac{a}{2} + l_{\text{як}}$$

где  $l_c = a' + \Delta_2 + A'_k + 0,5 \cdot d'_c$ .

Уточняют размеры зазоров в местах неразрывных деталей отдельных участков магнитопровода, т. е. нерабочих зазоров в месте сочленения полюсного наконечника и сердечника ( $\delta_{нр1}$ ,  $\delta_{нр2}$ ), сердечника и скобы. Указанные зазоры определяют, исходя из неплотного прилегания поверхностей стали ( $2 \times 0,005$ ) см, наличия антикоррозийных покрытий ( $2 \times 0,0015$ ) см, немагнитных прокладок (0,03 см), и принимают в пределах ( $0,05 \div 0,015$ ) см.

В поворотных системах необходимо найти средний зазор в области расположения точки вращения якоря при критической величине основного зазора  $\delta_0$  (рисунок 6.1):

$$\delta_a = \frac{a' \cdot \delta_0}{2 \cdot l_c}$$

где  $l_c = a' + \Delta_2 + A'_k + 0,5 \cdot d'_c$

Для прямоходовых систем  $\delta_a = \delta_0$ .

Результаты расчета конструктивных параметров проектируемого ЭМ следует свести в таблицу 6.4.

По принятым в проектном расчете размерам разрабатываемого ЭМ необходимо выполнить рабочий эскиз в масштабе 1:1 с указанием размеров в миллиметрах.

Таблица 6.4 - Результаты расчета конструктивных параметров проектируемого электромагнита

Основные расчетные параметры	Единица измерения	Значение
Критическая сила, $F_0$	кг	
Критический зазор, $\delta_0$	см	
Определяющий размер ядра ЭМ, $d$	см	
Диаметр полюсного наконечника, $d'$	см	
Высота обмотки, $H'$	см	
Высота катушки, $H'$	см	
Ширина катушки, $A'$	см	
Ширина намотки, $A'$	см	
Наружный диаметр катушки, $D'$	см	
Внутренний диаметр катушки, $D'$	см	
Боковая наружная поверхность, $Пбн$	см <sup>2</sup>	
Боковая внутренняя поверхность, $Пбв$	см <sup>2</sup>	
Торцевая поверхность, $Пт$	см <sup>2</sup>	
Ширина скобы магнитопровода, $B'$	см	

Толщина скобы магнитопровода, $a'$	см	
Толщина якоря, $e$	см	
Сечение скобы магнитопровода, $S_a$	см <sup>2</sup>	
Сечение якоря магнитопровода, $S_{як}$	см <sup>2</sup>	
Средняя длина силовых линий ярма, $l_{як}$	см	
Средняя длина силовых линий якоря, $l_{яр}$	см	

### 6.3 Проектный расчет основных параметров электромагнита

#### 6.3.1 Расчет основных параметров электромагнита

По значению критической силы  $F_0$ , величине зазора  $\delta_0$ , и понятному размеру сердечника  $d'_c$  определяем уточненные значения индукции в зазоре Вб/см<sup>2</sup>:

Для прямоходового ЭМ:

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

Для поворотного ЭМ:

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

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

$$\varepsilon' = \sqrt{1 + \frac{2,8}{(\tau \cdot x')'}}$$

где  $x' = d'_c / \delta_0$ .

Полученные результаты сравниваем с данными предварительного расчета и сделаем выводы.

Для дальнейших расчетов нужно знать, какая часть магнитного потока магнитопровода приходится на магнитный поток рассеивания. Рассеивающаяся в окружающую среду часть магнитного потока оценивается с помощью значения коэффициента рассеивания  $\sigma$  при критическом положении якоря.

Для этого предварительно нужно определить проводимость основного воздушного зазора, Гн:

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



где  $d'_c = \varepsilon' \cdot \tau \cdot d'_c$  – фиктивный диаметр рабочего воздушного зазора с учетом полюсного наконечника и выпучивания. Далее следует определить нерабочих воздушных зазоров, Гн:

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

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

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

$$G = \frac{0,5 \cdot G_0 \cdot G_{\text{нр}}}{0,5 \cdot G_0 + G_{\text{нр}}}.$$

Для поворотных ЭМ необходимо учесть дополнительно проводимость среднего зазора в области расположения точки вращения якоря  $\delta_0$ , Гн:

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

Тогда общая проводимость  $G$  (рисунок 3.2) по всем трем воздушным видам воздушных зазоров определится из соотношения:

$$G = \frac{G_0 \cdot G_{\text{нр}} \cdot G_a}{G_0 \cdot G_{\text{нр}} + G_0 \cdot G_a + G_{\text{нр}} \cdot G_a}.$$

Приведенная по магнитному потоку находится из соотношения:

$$G_y = \frac{g \cdot H'_k}{2},$$

где  $H'_k$  – полная высота катушки;  $g$  – удельная проводимость катушки.

- для проходного ЭМ с двумя сердечниками:

$$g = \frac{\pi \cdot \mu_0}{\ln \left[ \frac{1 + \sqrt{I^2 - (d'_c)^2}}{d'_c} \right]};$$

- для поворотного ЭМ:

$$g = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu_0}{\ln \left[ \frac{1 + \sqrt{I^2 - \left(\frac{d'_c}{2}\right)^2}}{0,5 \cdot d'_c} \right]};$$

В этих выражениях  $I$  - расстояние между осями катушки или между осью катушки и осью яма.

Теперь можно определить значение коэффициента рассеяния для критического положения якоря:

$$\sigma = \frac{G + G_a}{G}.$$

Определяем значение индукции в стали сердечника Вб/см<sup>2</sup>

$$B'_c = B'_0 \cdot \sigma \cdot (\varepsilon^3 \cdot \tau)^2.$$

$$S_0 = (\pi/4) \cdot (\varepsilon^3 \cdot \tau \cdot d'_c)^2 \text{ – эквивалентное сечение основного зазора.}$$

Определяем магнитодвижущую силу катушки ЭМ:

А) для проведения потока в рабочих зазорах:

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

где  $N$  – число рабочих воздушных зазоров;

Б) для проведения потока в нерабочих зазорах:

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

Необходимая МДС для проведения потока в стали вычисляется по найденным значениям индукции  $B'$  и  $B'$  и определенной по эскизу ЭМ, длине участка сердечника  $l_{\text{сс}}$  якоря  $l_{\text{як}}$  и ярма  $l_{\text{яр}}$  (с учетом наличия полюсных наконечников, рис. 6.2). При этом следует использовать кривые намагничивания принятого материала магнитопровода (Приложение 3) для нахождения напряженности поля, соответствующей индукции в металле:

$$(I \cdot W)'_{\text{ст}} = H_{\text{сс}} \cdot l_{\text{сс}} + H_{\text{як}} \cdot l_{\text{як}} + H_{\text{яр}} \cdot l_{\text{яр}},$$

где  $l_{\text{сс}} = H'_k + \Delta_1$ .

Общее значение МДС катушки:

$$(I \cdot W)' = (I \cdot W)'_0 + (I \cdot W)'_{\text{нр}} + (I \cdot W)'_{\text{ст}}.$$

Целесообразно сравнить полученную в результате проектного расчета МДС  $(I \cdot W)'$  с полученной в предварительном расчете  $(I \cdot W)$  и сделать вывод.

### 6.3.2 Определение параметров катушки электромагнита

Сравнение МДС проектного и предварительного расчета позволяет уточнить сечение и число витков катушки ЭМ. Определяем общее сечение меди (провода) обмотки:

$$S'_M = S_M \cdot \frac{(I \cdot W)'}{(I \cdot W)}$$

Определяем диаметр провода обмотки:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_M}{\pi}}$$

После чего следует подобрать ближайший по государственному стандарту (Приложение 2) диаметр провода без изоляции; определить диаметр провода с изоляцией  $d_1$  и сечение провода  $S_{пр}$ .

Определяем коэффициент заполнения окна намотки  $f_{зп}$  для идеальной шахматной укладки проводов  $f_{ш}$ :

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

Учитывая неравномерную укладку проводов при намотке, выполненной на автомате  $K_y = 0,9$ , необходимо найти реальный коэффициент заполнения:

$$f_{зп} = f_{ш} = K_y \cdot f_{зп}$$

Уточняем проектное число витков:

- при одной катушке:

$$W' = \frac{f'_3 \cdot A' \cdot H'}{S'_M};$$

- при двух катушках:

$$W'_{общ} = \frac{2 \cdot f'_3 \cdot A' \cdot H'}{S'_M};$$

Определяем сопротивление каждой катушки, отнесенное к  $0^\circ\text{C}$ ;

$$R'_0 = \frac{10^{-4} \cdot \rho_0 \cdot \pi \cdot D_{ср}}{S'_M} \cdot W',$$

где  $D_{ср} = \frac{D'_H \cdot D'_B}{2}$  - средний размер катушки;  $\rho_0 = 0,0162 \text{ Ом} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$  - удельное сопротивление меди при  $0^\circ\text{C}$ ;  $W'$  - число витков одной катушки.

Определяем потребляемую мощность:

– при одной катушке:

$$P_0 = \frac{U^2}{R'_0};$$

– при двух катушках:

$$P_0 = \frac{U^2}{4 \cdot R'_0}.$$

Определяем удельные потери в единице объема катушки Вт/см<sup>3</sup>

$$q_0 = \frac{P_0}{V},$$

где  $V = \pi \cdot D_{cp} \cdot A^2 \cdot H'$  - объем обмотки, см<sup>2</sup>.

### 6.3.3 Расчет теплового режима обмотки и весовых показателей электромагнита

Тепловой режим обмотки зависит от значительного числа конструктивных факторов и физических свойств материалов, использованных в обмотке ЭМ: способа намотки, толщины изоляции провода  $\delta$  и его материала, наличия изоляционных прокладок  $\Delta$ , размеров заполненного воздухом (лаком) пространства обмотки 1 и др. Расположение этих элементов в обмотке можно иллюстрировать эквивалентной картиной, приведенной на рисунке 6.3.

Для каждого приведенного элемента обмотки (рисунок 6.3) характерно определенное значение теплоемкости  $\lambda$ , полученное экспериментальным путем и приведенное в таблице 6.5.

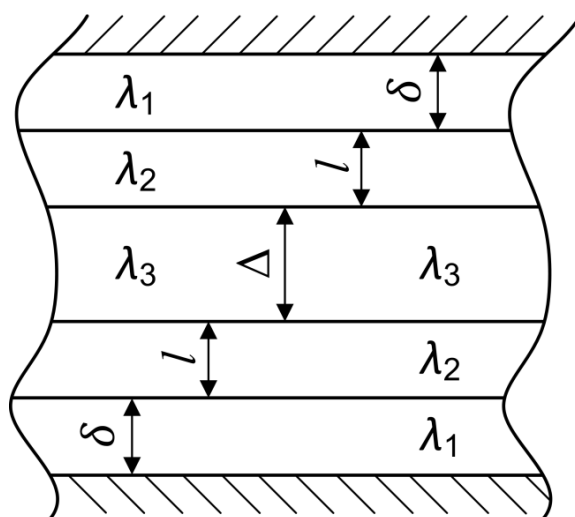


Рисунок 6.3 – Эквивалентная схема расположения элементов изоляции в обмотке

Таблица 6.5 - Рекомендуемые значения коэффициентов теплопроводности

Исполнение катушки	Коэффициент теплопроводности, Вт/(град · см · 10 <sup>-3</sup> )		
	Без пропитки	Пропитка лаком	Компаундировка
$\lambda_1$	(0,69 ÷ 0,71)	(1,15 ÷ 1,25)	(1,34)
$\lambda_2$	(0,25 ÷ 0,3)	(1,4 ÷ 2,2)	(1,4 ÷ 1,6)
$\lambda_3$	(0,5 ÷ 0,8)	(1,25 ÷ 1,3)	1,4

Примечание: Для эмалированного провода ПЭЛ следует принимать  $\lambda_1 = (2,3 \div 2,9)$  Вт/(град · см).

Приведенное значение коэффициента теплопроводности для изоляции всей катушки  $\lambda_H$  определяется по, Вт/(град · см):

$$\lambda_H = \frac{2 \cdot \delta + 2 \cdot l + \Delta}{\frac{2 \cdot \delta}{\lambda_1} + \frac{2 \cdot l}{\lambda_2} + \frac{\Delta}{\lambda_3}},$$

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

Эквивалентный коэффициент теплопроводности для всей катушки определяется как

$$\lambda = K_3 \cdot \lambda_H,$$

где  $K_3$  – некоторый экспериментально определенный, корректирующий коэффициент, характеризующий технологию выполнения обмотки, определяемый по графику зависимости  $K_3 = f(f_3)$ , приведенному на рисунке 6.4.

Далее необходимо произвести расчет температурного режима обмотки (катушки).

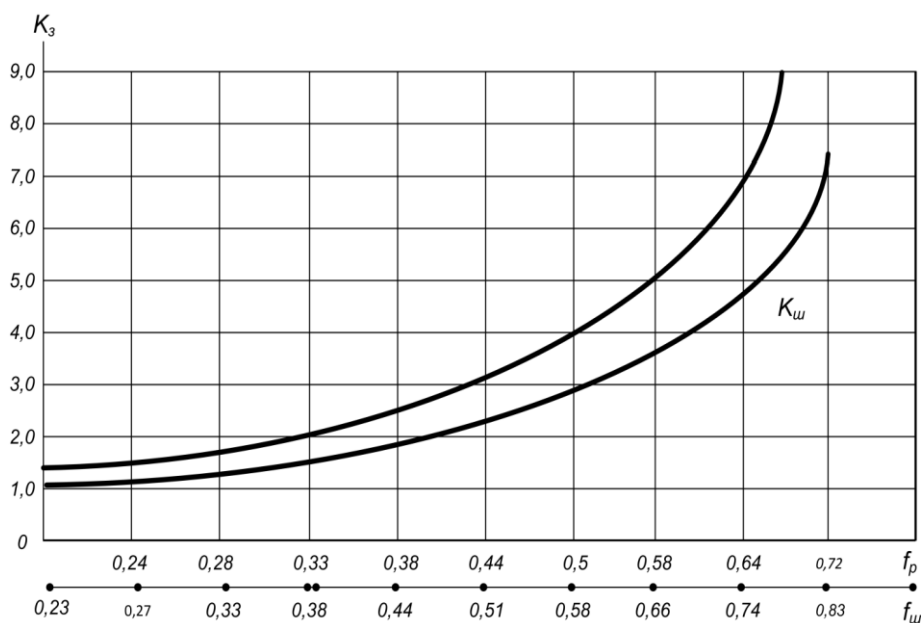


Рисунок 6.4 – График зависимости корректирующего коэффициента  $K_3 = f(f_3)$

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

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

$$\theta_{п} = 84,5 \cdot \left( \sqrt{1 + 25,4 \cdot \left( \frac{P_0}{S_{0x}} \right)} - 1 \right),$$

где  $P_0$  – мощность, потребляемая катушкой при сопротивлении проводов обмотки при температуре  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $S_{0x} = \pi \cdot H' \cdot (D' + \alpha \cdot D')$  – поверхность охлаждения через наружную и внутреннюю боковые поверхности. Тепловым потоком через торцевые поверхности можно пренебречь из-за наличия каркаса по торцам;  $\alpha = 1,7$  – коэффициент, учитывающий рост теплоотдачи с внутренней поверхности катушки (см. пункт 6.1.1).

Тогда температура поверхности катушки  $\nu_{п} = \theta_{п} + \nu_{oc}$ . Полученное значение температура поверхности  $\nu_{п}$  следует сравнить с допустимой  $\nu$  для принятого типа изоляции (Приложение 1).

С достаточной степенью точности можно считать, что средняя температура тела для катушки на  $(1,5 \div 3) \text{ } ^\circ\text{C}$  будет превышать температуру боковой ее поверхности  $\nu_{cp} = \nu_{п} + (1,5 \div 3,0) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Теперь можно найти сопротивление провода катушки при этой температуре, Ом:

$$R_{cp} = R'_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \nu_{cp}),$$

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

Определяем ток, потребляемый нагретой катушкой:

– при одной катушке

$$I = \frac{U}{R_{cp}};$$

– при двух катушках

$$I = \frac{U}{2 \cdot R_{cp}}$$

Общая МДС электромагнита при температуре  $\nu$  ос определяется из выражения:

$$(I \cdot W)' = W_{общ} \cdot I.$$

Результат определения  $(I \cdot W)'$  сравниваем с ранее найденным и делаем выводы.

Определяем мощность, необходимую для работы электромагнита в нагретом состоянии:

$$P = U \cdot I.$$

Далее выполняем расчет весовых показателей электромагнита. Определяем вес стали магнитопровода, кг:

$$Q_c = \gamma_c \cdot V_c,$$

где  $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^{-3}$  кгс/см<sup>3</sup> – удельный вес стали;

$V_c$  – объем стали магнитопровода, см<sup>3</sup> (находим по рабочему чертежу):

$$V_c = V_1 + V_2 + V_3 + V_4,$$

$V_1 = \frac{\pi \cdot d_n^2}{24} \cdot \Delta_1$  - объем стали полюсного наконечника;

$V_2 = S_c \cdot H'_k$  - объем стали сердечника электромагнита;

$V_3 = S_{як} \cdot 2 \cdot l_c$  - объем стали якоря;

$V_4 = S_a \cdot (2 \cdot l_c + H'_k + \Delta_1)$  – объем стали скобы электромагнита.

Определяем вес обмоточного провода, кг:

$$Q_{пр} = g \cdot L,$$

где  $g$  – расчетная масса 1м провода, кг/м;  $L = \pi \cdot D_{cp} \cdot W' \cdot 10^{-2}$  - длина обмоточного провода, м.

На этом проектный расчет параметров электромагнита заканчивается

#### **6.4 Выводы по результатам расчета**

Основные параметры электромагнита, полученные в результате проектного расчета, следует свести в таблицу 6.6 и сделать выводы по итогам выполненного расчета.

Таблица 6.6 - Результаты проектного расчета электромагнита

Основные расчетные параметры	Единица измерения	Значение
Рабочее напряжение, $U$	В	
Потребляемый ток, $I$	А	
Потребляемая мощность, $P$	Вт	
Подъемная сила, $F$	кг	
Число витков обмотки, $W$	витков	
Магнитодвижущая сила, $(I \cdot W)$	А · В	
Длина провода обмотки, $L$	м	
Диаметр провода, $d$	мм	
Рабочая температура обмотки, $t_{ср}$	°С	
Сопротивление нагретой обмотки, $R_{ср}$	Ом	
Веси меди / стали, $Q_M / Q_C$	кг/кг	
Общий вес электромагнита, $Q$	кг	

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учеб. / Л. А. Бессонов. - 11-е изд., перераб. и доп. - Москва: ЮРАЙТ, 2016. - 217 с.

2. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: учеб. В 2-х т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1981. - Т. 2. Ч. 3: Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. Ч. 4. Теория электромагнитного поля. - 415 с.

3. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2016. - 352 с.

4. Балла, О. М. Технологии и оборудование современного машиностроения: учеб. / О. М. Балла. - Санкт-Петербург: Лань, 2020. - 392 с.

5. Зубарев, Ю. М. Динамические процессы в технологии машиностроения. Основы конструирования машин: учеб. пособие / Ю. М. Зубарев. - Санкт-Петербург: Лань, 2018. - 212 с.

6. Сипайлова, Н. Ю. Электрические и электронные аппараты. Проектирование: учеб. пособие для вузов / Н. Ю. Сипайлова. - Москва: Изд-во ЮРАЙТ, 2021. - 167 с. - (Высшее образование).

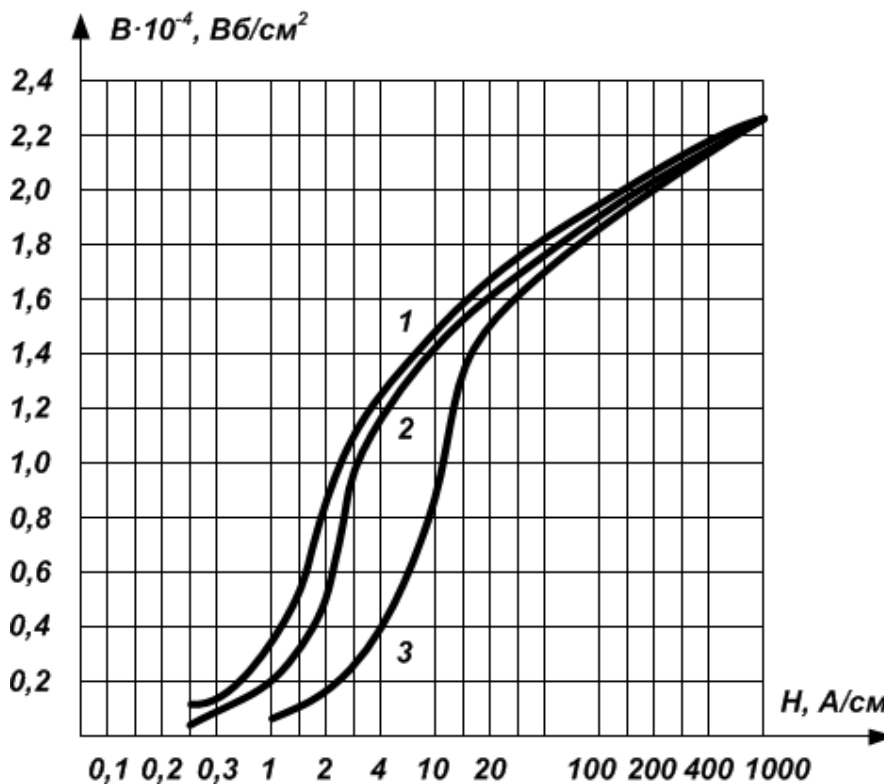


Допустимые температуры нагрева провода обмотки

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

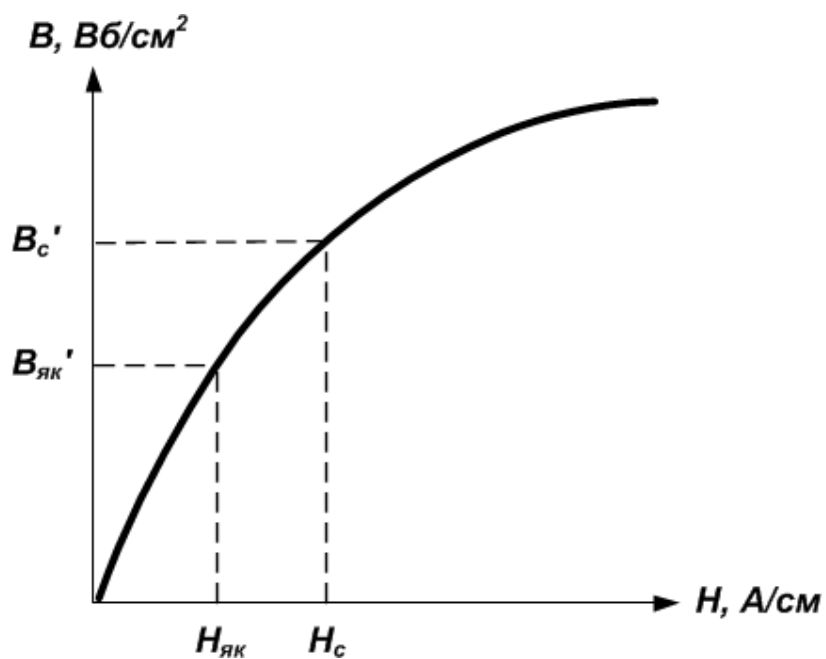
Обмоточные провода круглые (по ГОСТ 324-52)

Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Вес 1 км, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	0,00196	0,01746	0,47	0,1735	1,542	1,30	1,327	11,80
0,06	0,00283	0,0252	0,49	0,1886	1,676	1,35	1,431	12,73
0,07	0,00385	0,0342	0,51	0,2043	1,816	1,40	1,539	13,69
0,08	0,00503	0,0447	0,53	0,221	1,961	1,45	1,651	14,68
0,09	0,00636	0,0566	0,55	0,238	2,11	1,50	1,767	15,71
0,10	0,00785	0,0698	0,57	0,255	2,27	1,56	1,91	16,99
0,11	0,00950	0,0845	0,59	0,273	2,43	1,62	2,06	18,32
0,12	0,01131	0,1005	0,62	0,302	2,68	1,68	2,217	19,71
0,13	0,01327	0,1180	0,64	0,322	2,86	1,74	2,38	21,1
0,14	0,01539	0,1368	0,67	0,353	3,13	1,81	2,57	22,9
0,15	0,01767	0,1571	0,69	0,374	3,32	1,88	2,78	24,7
0,16	0,0201	0,1788	0,72	0,407	3,62	1,95	2,99	26,5
0,17	0,0227	0,202	0,74	0,430	3,82	2,02	3,205	28,5
0,18	0,0255	0,226	0,77	0,466	4,14	2,10	3,46	30,8
0,19	0,0284	0,252	0,80	0,503	4,47	2,26	4,01	35,7
0,20	0,0314	0,279	0,83	0,541	4,81	2,44	4,68	41,6
0,21	0,0346	0,308	0,86	0,581	5,16	2,63	5,43	48,3
0,23	0,0415	0,369	0,90	0,636	5,66	2,83	6,29	55,9
0,25	0,0491	0,436	0,93	0,679	6,04	3,05	7,31	65,0
0,27	0,0573	0,509	0,96	0,724	6,43	3,28	8,45	75,1
0,29	0,0661	0,587	1,00	0,785	6,98	3,53	9,79	87,0
0,31	0,0755	0,671	1,04	0,849	7,55	3,80	11,34	100,8
0,33	0,0855	0,760	1,08	0,916	8,14	4,10	13,20	117,4
0,35	0,0962	0,855	1,12	0,985	8,75	4,50	15,90	141,4
0,38	0,1134	1,008	1,16	1,057	9,40	4,80	18,10	160,9
0,41	0,1320	1,173	1,20	1,131	10,05	5,20	21,2	188,8
0,44	0,1521	1,352	1,25	1,227	10,91	—	—	—



Кривые намагничивания магнитных материалов:

- 1 – сталь низкоуглеродистая марки Э отожженная;
- 2 – сталь конструкционная марки Э отожженная;
- 3 - сталь качественная конструкционная марки 20 отожженная



Ключ к определению МДС в стали

**Образец титульного листа**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства  
Кафедра энергетики

Зачтено с отметкой \_\_\_\_\_  
Дата защиты \_\_\_\_\_  
Преподаватель \_\_\_\_\_

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

«Расчет электромагнита постоянного тока»

по модулю «Технология проектирования электроустановок»  
направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Работу выполнил:  
студент гр. ХХ-ЭЭм  
Иванов И.И.

Калининград  
20XX

Локальный электронный методический материал

Максим Сергеевич Харитонов

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Редактор Э. С. Круглова

Уч.-изд. л. 2,7. Печ. л. 2,4

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1