

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

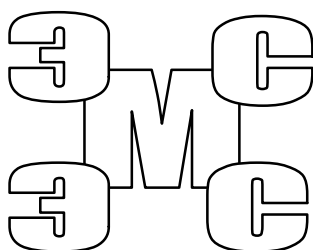
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра электромеханических систем и электроснабжения

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям и курсовому проектированию  
по дисциплине «Проектирование электрических машин»  
для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электромеханика»)  
очной формы обучения



Воронеж 2020

УДК 621.313.0012(07)  
ББК 31.26я7

**Составители:** Т. Е. Черных, канд. техн. наук А. В. Тикунов

Проектирование электродвигателя постоянного тока: методические указания к практическим занятиям и курсовому проектированию по дисциплине «Проектирование электрических машин» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электромеханика») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. Е. Черных, А. В. Тикунов. Воронеж: Изд-во ВГТУ. 2020. - 32 с.

Основной целью указаний является получение практических навыков расчетного и конструкторского проектирования электродвигателя постоянного тока.

Предназначены для проведения практических занятий, а также выполнения курсового проекта по дисциплине «Проектирование электрических машин» учащимися очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Практикум ПЭМ.pdf».

Табл. 11. Библиогр.: 3 назв.

**УДК 621.313.0012(07)**  
**ББК 31.26я7**

**Рецензент** – Л. Н. Титова, канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения Воронежского государственного технического университета

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ .....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....	5
ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ.....	6
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. Выбор главных размеров .....	7
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. Расчет параметров якоря .....	8
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3. Расчет магнитной системы машин постоянного тока .....	11
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. Расчет системы возбуждения машин постоянного тока. ....	17
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5. Оценка коммутационных параметров .....	20
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. Потери мощности машин постоянного тока .....	22
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7. Расчет рабочих характеристик машин постоянного тока. ....	25
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8. Тепловой расчет. ....	26
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 9. Вентиляционный расчет. ....	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	31

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Проектирование электрических машин» для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электромеханика» очной формы обучения.

Цель практических работ – закрепление теоретического материала, полученного на лекционных занятиях, а также получение первых навыков инженерных расчетов на примерах решения конкретных задач.

Цель курсового проектирования – закрепление и расширение знаний, полученных на лекциях, лабораторных и практических занятиях по принципам построения электрических машин постоянного тока, методике их расчета, а также развитие навыков самостоятельной работы и умений использования специальной технической литературы.

В результате выполнения практических работ и курсового проектирования студент должен:

Уметь:

– рассчитывать и конструировать работоспособные детали и узлы, с учетом свойств необходимых материалов и наиболее подходящих способов получения заготовок;

- выполнять принятое техническое решение по изготовлению деталей и узлов электрических машин и механизмов с заданными входными или выходными характеристикам;

Владеть:

– методами расчета, необходимыми для решения задач анализа и синтеза объектов проектирования.

## **ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Перед выполнением практических работ студент должен строго выполнить весь объем домашней подготовки; знать, что выполнению каждой работы предшествует проверка готовности студента.

При выполнении работ студент должен самостоятельно изучить методические рекомендации по проведению конкретной работы; выполнить соответствующие расчеты; пользоваться справочной и технической литературой; подготовить ответы на контрольные вопросы.

Изучая теоретическое обоснование, студент должен иметь в виду, что основной целью изучения теории является умение применить ее на практике для решения практических задач.

При решении задач рекомендуется сначала наметить ход решения. В случае простых задач рекомендуется сначала найти решение в общем виде, лишь в конце поставив числовые значения. В случае задач с большим

вычислением рекомендуется после того, как намечен ход решения, подставлять числовые значения и проводить вычисления в промежуточных формулах.

После выполнения работы студент должен представить отчет о проделанной работе с полученными результатами.

Все схемы и рисунки, сопровождающие выполнение практических работ выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ.

Аттестация по дисциплине проводится с учетом выполнения каждой практической работы. При отсутствии студента по неуважительной причине студент выполняет работу самостоятельно, в свое личное время и защищает на консультации по указанию преподавателя.

Неаккуратное выполнение практической работы, несоблюдение принятых правил и плохое оформление чертежей и схем могут послужить причиной возвращения работы для доработки.

## **ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект выполняется в соответствии с индивидуальным заданием, выданным преподавателем. Курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части. Оформление курсового проекта должно соответствовать СТП ВГТУ и ЕСКД.

Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) должна содержать все необходимые расчеты, а также поясняющие схемы и рисунки.

РПЗ должна быть выполнена в печатном виде на листах формата А4 по ГОСТ 9327 (210x297 мм). Текст следует набирать, соблюдая следующие размеры полей: правое — 10 мм; левое — 20 мм; верхнее — 20 мм; нижнее — 10 мм;

Набор текста в текстовом редакторе должен удовлетворять следующим требованиям: шрифт Times New Roman, кегль 14, цвет шрифта – черный, межстрочный интервал – 1,5. Текст должен быть отформатирован по ширине страницы с применением автоматического переноса слов, первая строка с абзацным отступом 1,25 см.

Страницы РПЗ следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту, включая приложения.

Номер страницы проставляют в центре нижней части страницы без точки.

Титульный лист включается в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Наименования структурных элементов «СОДЕРЖАНИЕ», «ВВЕДЕНИЕ», «ЗАКЛЮЧЕНИЕ», «СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ», «ПРИЛОЖЕНИЕ» служат заголовками этих структурных элементов. Заголовки структурных элементов следует располагать по центру строки без точки в конце и печатать прописными буквами, не подчеркивая. Расстояние между заголовком и текстом должно быть равно одной строке. Каждый структурный элемент КП следует

начинать с новой страницы. Страница КП должна быть заполнена текстом не менее чем на 1/3 часть. Содержание включает все структурные элементы КП с указанием номеров страниц, с которых они начинаются.

Для основной части приводятся наименования всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование). Приложения указываются с их наименованием. Иллюстрации (чертежи, графики, диаграммы, схемы, фотоснимки, компьютерные распечатки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или на следующей странице.

РПЗ содержит титульный лист, задание на курсовой проект, содержание, введение, основную часть, заключение, список литературы и чертежи, оформленные в виде приложений.

Основная часть работы содержит электромагнитный, тепловой и вентиляционный расчеты.

Графическая часть проекта состоит из сборочного чертежа спроектированного электродвигателя и спецификации к нему. Вся графическая документация должна быть выполнена в соответствии с требованиями ЕСКД.

Расчетное проектирование необходимо проводить согласно методике изложенной в [1 - 3].

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Любая работа по созданию технически сложного устройства, системы или строения требует тщательно выверенных расчетов и действий, анализа и оценки основополагающих факторов для дальнейшей работы. С одной стороны проектирование включает в себя расчеты и детали, но чтобы дойти до проекта, нужно еще сделать оценку и проанализировать целесообразность создания объекта. Для этого выполняется техническое задание на проектирование.

Техническое задание на курсовое проектирование выдается преподавателем. Для удобства выполнения курсового проекта рекомендуется заполнить табл. 1.

Таблица 1

Техническое задание на курсовое проектирование

Наименование объекта проектирования	
Область применения объекта проектирования	
Технические параметры	$P_n =$
Номинальная мощность (кВт)	$U_n =$
Номинальное напряжение (В)	$n_n =$
Номинальная частота вращения (об/мин)	$h =$
Высота оси вращения (мм)	

Номинальный режим работы	
Тип возбуждения	
Источник и условия питания	
Исполнение по степени защиты	
Исполнение по способу охлаждения	
Конструктивное исполнение	
Требования к характеристикам	
Требования к конструкции	
Требования к взаимозаменяемости деталей и узлов машины	
Дополнительные требования	

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 1. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Цель практической работы 1 – Получение практических навыков выбора главных размеров проектируемой машины.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 2, где приводится методика выполнения расчетов.

Таблица 2

1.1 Определение главных размеров						
1.1.1 Диаметр якоря $D = (h - 0,004), м.$	$h = \quad м .$					
1.1.2 Линейная нагрузка $A$ , индукция в воздушном зазоре $B_\delta$ ; коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_\delta$ , /1, рис. 11-8, 11-9, 11-10/, /2, табл. 1/.		Минимум	Ср. значение	Максимум		
	$A, A/м$					
	$B_\delta, Тл$					
	$\alpha_\delta$					
1.1.3 Расчетная электромагнитная мощность $P' = P_n \cdot \frac{1+\eta}{2 \cdot \eta}$ , $Вт.$ к.п.д. $\eta = \quad$ о.е., /1, рис.11-7/, /2, табл. 2/.						
1.1.4 Длина воздушного зазора $l_\delta = \frac{6,1 \cdot P'}{A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_i \cdot \alpha_\delta}$ , $м.$ Расчет проводится при различных сочетаниях значений $A, B_\delta, \alpha_\delta$ .	№	1	2	3	4	5
	$l_\delta, м$					

1.1.5 Отношение главных размеров $\lambda = l_{\delta} / D.$	$\lambda = l_{\delta} / D$					
1.1.6 Выбираем вариант № : $\lambda =$ ; $l_{\delta} =$ м; $A =$ А/м; $B_{\delta} =$ Тл; $\alpha_{\delta} =$ .						

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРЯ

Цель практической работы 2. Получение практических навыков выбора типа обмотки якоря, а также расчета параметров обмотки и зубцовой зоны якоря.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 3, где приводится методика выполнения расчетов.

Таблица 3

1.2 Выбор типа обмотки якоря	
1.2.1 Ток якоря $I = \frac{P_{\text{н}}}{\eta \cdot U_{\text{н}}} (1 - k_{\text{в}}), A.$ $k_{\text{в}} =$ /1, табл. 11-8/, /2, табл. 3/.	
1.2.2 Ток параллельной ветви $2a =$ ; $I_a = \frac{I}{2a}, A.$	Тип обмотки –
1.3 Определение обмоточных данных	
1.3.1 Число зубцов $Z_{\text{min}} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\text{max}}}; \quad Z_{\text{max}} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\text{min}}},$ $t_{1\text{min}} =$ , $t_{1\text{max}} =$ /1, стр. 608/, /2, табл. 4/.	Принимаем $Z =$ .
1.3.2 Зубцовое деление $t_1 = \frac{\pi \cdot D}{Z}, \text{ м.}$	
1.3.3 Предварительное число эффективных проводников $N = \frac{A \cdot \pi \cdot D \cdot 2a}{I}.$	
1.3.4 Число эффективных проводников в пазу $N_{\text{п}} = \frac{N}{Z}.$	Принимаем $N_{\text{п}} =$ . Уточняем $N = N_{\text{п}} \cdot Z =$ .



1.3.5 Диаметр коллектора $D_k = (0,65 \dots 0,8) D$ , м.	Принимаем $D_k =$ /1, стр. 609/.		
1.3.6 Число коллекторных пластин $K = u_n \cdot Z$ ; $u_n = 1, 3, 5$ .	$u_n = 1$	$u_n = 3$	$u_n = 5$
1.3.7 Число витков в секции $w_c = N / 2K$			
1.3.8 Напряжение между коллекторными пластинами $U_{к,ср} = 2p \cdot U_n / K$ , В.			
1.3.9 Коллекторное деление $t_k = \pi \cdot D_k / K$ , м /2, табл. 6/			
1.3.10 Уточненное число проводников $N = 2 u_n \cdot w_c \cdot Z$ .	Выбираем вариант с $u_n =$ .		
1.3.11 Число витков в обмотке якоря $w_a = \frac{N}{2}$ .			
1.3.12 Первый частичный шаг $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$ ; $y_{1п} = \frac{y_1}{u_n}$ ; $2p =$ .			
1.3.13 Шаг по коллектору и второй частичный шаг $m =$ ; $y_k = \frac{K \pm m}{p}$ ; $y_2 = y_k - y_1$ ; $y_{2п} = \frac{y_2}{u_n}$ .			
1.3.14 Уточненная линейная нагрузка $A = \frac{N \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot u_n \cdot w_c \cdot Z \cdot I_a}{\pi \cdot D}$ , А/м.			
1.3.15 Уточняем длину воздушного зазора $l_\delta = \frac{6,1 \cdot P'}{\alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_n}$ , м.			
1.3.16 Плотность тока в обмотке якоря $J_a = \frac{(A \cdot J_a)}{A}$ , А/м <sup>2</sup> . ( $A \cdot J_a$ ) = , /1, рис.11-11/, /2, табл. 7/.			
1.3.17 Поперечное сечение эффективного проводника $q_a = \frac{I}{2a \cdot J_a}$ , м <sup>2</sup> . Если необходимо $n_{эл} =$ ; $q_{эл} = q_a / n_{эл}$ . Сечение нормируется /1, ПЗ-1/ $q_{эл} =$ ; $d_{из} =$ ; $d_{гол} =$ .	Сечение эффективного проводника $q_a = n_{эл} \cdot q_{эл} =$ .		

1.3.18 Сопrotивление обмотки якоря $R_a = m_t \cdot \rho \frac{N \cdot l_{acp}}{(2a)^2 \cdot q_a}, \text{ Ом.}$ $m_t = 1,22; \quad l_{acp} = l_{л} + l_{п};$ $l_{л} = (1,2 \div 1,35) \cdot \tau;$ $\tau = \pi \cdot D / 2p; \quad l_{п} = l_{\delta}.$	
1.3.19 Масса проводников обмотки якоря $M_a = m_M \cdot l_{acp} \cdot N \cdot q_a, \text{ кг.}$ Удельная масса меди $m_M = 8900 \text{ кг/м}^3.$	
<b>1.4 Расчет геометрии зубцовой зоны</b>	
1.4.1 Ширина зубца при овальной форме паза $b_z = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_c \cdot B_{zd}}, \text{ м.}$ $k_c = \quad /1, \text{ табл. 9-13/};$ $B_{zd} = \quad /1, \text{ табл. 11-9/}, /2, \text{ табл. 9/}.$	
1.4.2 Высота паза $h_{п} = \quad \text{ м}, \quad /1, \text{ рис. 11-12/}, /2, \text{ табл. 10/}.$	
1.4.3 Внутренний диаметр якоря $D_o \approx 0,3 \cdot D, \text{ м.}$ $D_o \text{ нормируется } /1, \text{ табл. 11-11/}.$	Нормированное значение $D_o = \quad .$
1.4.4 Большой радиус паза $r_1 = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_{ш}) - Z \cdot b_z}{2 \cdot (Z + \pi)}, \text{ м.}$ $h_{ш} = \quad /1, \text{ стр. 612/}.$	
1.4.5 Малый радиус паза $r_2 = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_{п}) - Z \cdot b_z}{2 \cdot (Z - \pi)}, \text{ м.}$	
1.4.6 Расстояние между центрами $h_1 = h_{п} - h_{ш} - r_1 - r_2, \text{ м.}$	
1.4.7 Площадь паза в штампе $S_{п} = \frac{\pi}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_1, \text{ м}^2.$	
1.4.8 Площадь пазовой изоляции $S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_1), \text{ м}^2.$ $b_{из} = \quad \text{ м}, \quad /1, \text{ табл. 3-18/}.$	
1.4.9 Площадь пазового клина $S_k = (0,3 \dots 0,5) \cdot \pi \cdot r_1^2, \text{ м}^2.$	

Окончание табл. 3	
1.4.10 Площадь паза под обмотку $S_{\text{по}} = S_{\text{п}} - S_{\text{из}} - S_{\text{к}}, \text{ м}^2.$	
1.4.11 Площадь обмотки $S_{\text{об}} = 2 \cdot n_{\text{эл}} \cdot d_{\text{из}}^2 \cdot u_{\text{п}} \cdot w_{\text{с}}, \text{ м}^2.$	
1.4.12 Коэффициент заполнения паза $k_3 = \frac{S_{\text{об}}}{S_{\text{по}}}.$	

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 3. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель практической работы 3. Получение практических навыков расчета магнитной цепи электрических машин.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 4, где приводится методика выполнения расчетов.

Таблица 4

<b>2.1 Воздушный зазор под главным полюсом</b>	
2.1.1 Величина воздушного зазора $\delta = (0,007 \dots 0,009) \cdot D, \text{ м}.$	
2.1.2 Полюсное деление $\tau = \pi \cdot D / 2p, \text{ м}.$	
2.1.3 Ширина полюсного наконечника $b_p = \alpha_{\delta} \cdot \tau, \text{ м}.$	
2.1.4 Коэффициент воздушного зазора $k_{\delta} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta}{t_1 - b_{\text{ш}} + 10 \cdot \delta},$ $b_{\text{ш}} = \quad /1, \text{ стр. 612/}.$	
2.1.5 Уточнение величины воздушного зазора $\delta \geq \frac{\mu_0}{(1,15 \dots 1,25) \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta}} \cdot \frac{A \cdot b_p}{2}, \text{ м}.$	Принимаем $\delta =$ .
2.1.6 Предварительное значение ЭДС якоря $E_{\text{н}} = U_{\text{н}} \cdot k_{\text{д}}, \text{ В}.$ $k_{\text{д}} = \quad /2, \text{ табл. 12/}.$	
2.1.7 Магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta} = \frac{60 \cdot a \cdot E_{\text{н}}}{p \cdot N \cdot n_{\text{н}}}, \text{ Вб}.$	

2.1.8 Площадь сечения воздушного зазора $S_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}, M^2.$	
2.1.9 Магнитная индукция воздушного зазора $B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}}, Tл.$	
2.1.10 Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре $H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot 10^6, A/м.$	
2.1.11 Расчетная длина воздушного зазора $L_{\delta} = k_{\delta} \cdot \delta, м.$	
2.1.12 Магнитное напряжение воздушного зазора $F_{\delta} = H_{\delta} \cdot L_{\delta}, A.$	
<b>2.2 Зубцовая зона сердечника якоря</b>	
2.2.1 Магнитный поток в зубцовой зоне $\Phi_z = \Phi_{\delta} = \frac{60 \cdot a \cdot E_H}{p \cdot N \cdot n_H}, Вб.$	
2.2.2 Площадь сечения зубцовой зоны при овальной форме паза $S_z = \frac{Z \cdot \alpha_{\delta} \cdot b_z \cdot l_{\delta} \cdot k_c}{2p}, M^2.$	
2.2.3 Магнитная индукция зубцовой зоны $B_z = \frac{\Phi_{\delta}}{S_z}, Tл; \quad B_z \leq B_{зд},$ $B_{зд} = \quad /1, табл. 11-9/, /2, табл. 9/.$	Марка стали зубцовой зоны якоря /2, табл. 13/.
2.2.4 Напряженность магнитного поля зубцовой зоны якоря $H_z, A/м$ : если $B_z \leq 2,0 Tл$ /1, П1.5; П1.8/; если $B_z > 2,0 Tл$ /1, рис. П 2.3; рис. П2.4/ при $k_z = \frac{t_1 \cdot l_{\delta}}{b_z \cdot l_a \cdot k_c}$ ; $l_a = l_{\delta}$ если нет радиальных вентиляционных каналов.	
2.2.5 Расчетная длина зубцового слоя при пазах овальной формы $L_z = h_{п} - 0,2 \cdot r_1, м.$	

Продолжение табл. 4	
2.2.6 Магнитное напряжение зубцового слоя	
$F_z = H_z \cdot L_z, A.$	
<b>2.3 Ярмо сердечника якоря</b>	
2.3.1 Магнитный поток в ярме якоря	
$\Phi_j = \frac{\Phi_\delta}{2}, Bб.$	
2.3.2 Площадь сечения ярма сердечника якоря	
$S_j = l_\delta \cdot h_j \cdot k_c, м; \quad h_j = \frac{D - D_0}{2} - h_n.$	
2.3.3 Магн. индукция ярма сердечника якоря	
$B_j = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot S_j}, Tл;$	
$B_j \leq B_{jd}, B_{jd} =$	Марка стали ярма сердечника якоря
/1, табл.11-10/, /2, табл. 11/.	
2.3.4 Напряженность магнитного поля ярма сердечника якоря $H_j, A.$	/1, П1.5; П1.8/.
2.3.5 Расчетная длина ярма сердечника якоря	
$L_j = \frac{\pi \cdot (D_0 + h_j)}{4\rho} + \frac{h_j}{2}, м.$	
2.3.6 Магнитное напряжение ярма сердечника якоря	
$F_j = H_j \cdot L_j, A.$	
<b>2.4 Сердечник главного полюса</b>	
2.4.1 Магнитный поток в сердечнике главного полюса	
$\Phi_r = \sigma_r \cdot \Phi_\delta, Bб.$	
$\sigma_r = 1,2$ /1, стр. 631/.	
2.4.2 Площадь сечения сердечника главного полюса	
$S_r = l_r \cdot b_r \cdot k_c, м^2.$	
$l_r = l_\delta; \quad b_r = b_p - 2 \cdot b_n; \quad b_n = 0,1 \cdot b_p.$	
2.4.3 Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	
$B_r = \frac{\sigma_r \cdot \Phi_\delta}{S_r}, Tл.$	
$B_r \leq B_{рд}, B_{рд} =$	Марка стали сердечника главного полюса _____
/1, стр. 627/.	
2.4.4 Напряженность магнитного поля сердечника главного полюса $H_r$	/1, П1.16/.
2.4.5 Расчетная длина сердечника главного полюса	
$L_r = h_r, м.$	
$h_r =$	/1, рис. 11-23/, /2, табл. 14/.

2.4.6 Магнитное напряжение сердечника главного полюса $F_{\Gamma} = H_{\Gamma} \cdot L_{\Gamma}, A.$	
<b>2.5 Зазор между полюсом и станиной</b>	
2.5.1 Магнитный поток в зазоре между станиной и полюсом $\Phi_{\text{сп}} = \Phi_{\Gamma}, Bб.$	
2.5.2 Площадь сечения зазора между станиной и полюсом $S_{\text{сп}} = S_{\Gamma}, м^2.$	
2.5.3 Магнитная индукция в зазоре между станиной и полюсом $B_{\text{сп}} = B_{\Gamma}, Тл.$	
2.5.4 Напряженность магнитного поля в зазоре $H_{\text{сп}} = \frac{B_{\text{сп}}}{\mu_0} = 0,8 \cdot B_{\text{сп}} \cdot 10^6, A/м.$	
2.5.5 Расчетная длина зазора между станиной и полюсом $L_{\text{сп}} = 2 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4} + 10^{-4}, м.$	
2.5.6 Магнитное напряжение зазора между станиной и полюсом $F_{\text{сп}} = H_{\text{сп}} \cdot L_{\text{сп}}, A.$	
<b>2.6 Станина</b>	
2.6.1 Магнитный поток в станине с учетом его разветвления $\Phi_c = \frac{\Phi_{\Gamma}}{2} = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi_{\delta}}{2}, Bб.$	
2.6.2 Площадь сечения станины $S_c = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi_{\delta}}{2 \cdot B_{\text{сд}}}, м^2.$	
2.6.3 Магнитная индукция в станине $B_c = \frac{\sigma_{\Gamma} \cdot \Phi_{\delta}}{2 \cdot S_c}, Тл.$ $B_c \leq B_{\text{сд}}, B_{\text{сд}} = /1, \text{ стр. 627}/.$	Марка стали станины _____
2.6.4 Напряженность магнитного поля в станине $H_c /1, П1.14/.$	
2.6.5 Расчетная длина станины $L_c = \frac{\pi \cdot (D_n - h_c)}{4p} + \frac{h_c}{2}, м.$ $h_c = \frac{S_c}{l_c}, l_c = l_{\delta} + 0,6 \cdot \tau \text{ при } 2p = 4 ;$ $D_n = D + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{\Gamma} + 2 \cdot L_{\text{сп}} + 2 \cdot h_c .$	
2.6.6 Магнитное напряжение в станине $F_c = H_c \cdot L_c, A.$	

Для построения характеристики намагничивания машины постоянного тока необходимо определить сумму МДС всех участков магнитной цепи при значениях магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi_{\delta} = 0,5; 0,75; 0,9; 1,1$  и  $1,15 \Phi_{\text{ном}}$  [1]. Для удобства расчетов данные целесообразно представить в виде табл. 5.

Таблица 5

Расчет характеристик намагничивания

Расчетная величина	$0,5 \cdot E_H$	$0,75 \cdot E_H$	$0,9 \cdot E_H$	$1,0 \cdot E_H$	$1,1 \cdot E_H$	$1,15 \cdot E_H$
2.1.6 ЭДС обмотки якоря $E_H = k_d \cdot U_H = \quad, B.$						
<b>Воздушный зазор под главным полюсом</b>						
2.1.7 Магнитный поток в воздушном зазоре						
2.1.8 Площадь сечения воздушного зазора						
2.1.9 Магнитная индукция в воздушном зазоре						
2.1.10 Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре						
2.1.11 Расчетная длина воздушного зазора						
2.1.12 Магнитное напряжение воздушного зазора						
<b>Зубцовая зона сердечника якоря</b>						
2.2.1 Магнитный поток в зубцовой зоне						
2.2.2 Площадь сечения зубцовой зоны при овальной форме паза						
2.2.3 Магнитная индукция в зубцах якоря						
2.2.4 Напряженность магнитного поля в зубцах якоря						
2.2.5 Расчетная длина зубцового слоя при овальной форме паза						
2.2.6 Магнитное напряжение зубцов якоря						

<b>Ярмо сердечника якоря</b>						
2.3.1 Магнитный поток в ярме сердечника якоря						
2.3.2 Площадь сечения ярма сердечника якоря						
2.3.3 Магнитная индукция в ярме сердечника якоря						
2.3.4 Напряженность магнитного поля в ярме сердечника якоря						
2.3.5 Расчетная длина ярма сердечника якоря						
2.3.6 Магнитное напряжение ярма сердечника якоря						
<b>Сердечник главного полюса</b>						
2.4.1 Магнитный поток в сердечнике главного полюса						
2.4.2 Площадь сечения сердечника главного полюса						
2.4.3 Магнитная индукция в сердечнике главного полюса						
2.4.4 Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса						
2.4.5 Расчетная длина сердечника главного полюса						
2.4.6 Магнитное напряжение сердечника главного полюса						
<b>Зазор между станиной и полюсом</b>						
2.5.1 Магнитный поток в зазоре между станиной и полюсом						



Окончание табл. 5						
2.5.2 Площадь сечения зазора между станиной и полюсом						
2.5.3 Магнитная индукция в зазоре между станиной и полюсом						
2.5.4 Напряженность магнитного поля в зазоре						
2.5.5 Расчетная длина зазора между станиной и полюсом						
2.5.6 Магнитное напряжение за-зора между станиной и полюсом						
<b>Станина</b>						
2.6.1 Магнитный поток в станине с учетом его разветвления						
2.6.2 Площадь сечения станины						
2.6.3 Магнитная индукция в станине						
2.6.4 Напряженность магнитного поля в станине						
2.6.5 Расчетная длина станины						
2.6.6 Магнитное напряжение станины						
Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_z + F_j + F_r + F_{cl} + F_c$						
Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя $F_{\delta z j} = F_{\delta} + F_z + F_j$						

#### **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 4. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Цель практической работы 4. Получение практических навыков расчета системы возбуждения.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 6, где приводится методика выполнения расчетов.

Таблица 6

<b>3.1 Определение размагничивающего действия поперечной реакции якоря</b>	
3.1.1 Определяем $A \cdot b_p / 2, A$ .	
3.1.2 По переходной характеристике $B_\delta = f(F_{\delta zj})$ определяем $B_{\delta \max}$ и $B_{\delta \min}$ /1, рис. 11-16/, /2, рис./.	
3.1.3 Среднее значение индукции в воздушном зазоре $B_{\delta \text{ср}} = \frac{B_{\delta \max} + B_{\delta \min} + 4 \cdot B_\delta}{6}, \text{ Тл.}$	
3.1.4 Размагничивающее действие поперечной реакции якоря $F_{qd}$ определяется по переходной х-ке /1, рис.11-16/, /2, рис./.	
<b>3.2 Расчет обмоток при параллельном возбуждении</b>	
3.2.1 Необходимое значение МДС обмотки параллельного возбуждения $F_H = F_B,$ $F_B = F_\Sigma + F_{qd}.$	
3.2.2 Поперечное сечение проводников параллельной обмотки возбуждения $q_B = \frac{m_t \cdot \rho \cdot k_{\text{зап}} \cdot 2p \cdot F_B \cdot l_{\text{вср}}}{a_B \cdot U_B}, \text{ М}^2.$ $U_B = U_H; \quad a_B = 1; \quad k_{\text{зап}} = 1,1 \div 1,2;$ $l_{\text{вср}} = 2(l_\Gamma + b_\Gamma) + \pi(b_{\text{КВ}} + 2b_{\text{ИЗ}}),$ $b_{\text{ИЗ}} = \quad /1, \text{ табл. 11-2/; } b_{\text{КВ}} = 0,12 \cdot D$ Поперечное сечение проводников $q_B$ нормируется /1, ПЗ.1, ПЗ.2/.	Принимаем $q_B =$ .
3.2.3 Число витков на один полюс $w_B = \frac{F_B \cdot a_B}{I_B},$ $I_B = J_B \cdot q_B \cdot a_B; \quad J_B = \quad \text{А/М}^2,$ /1, стр. 632/.	Число витков округляется $w_B =$ .
3.2.4 Сопротивление обмотки возбуждения $R_B = m_t \cdot \rho \cdot \frac{2p \cdot w_B \cdot l_{\text{вср}}}{(a_B)^2 \cdot q_B}, \text{ Ом.}$	
3.2.5 Масса меди обмотки возбуждения $M_B = m_M \cdot 2p \cdot w_B \cdot l_{\text{вср}} \cdot q_B, \text{ кг.}$	

<p>3.2.6 Коэффициент запаса</p> $k_{\text{зап}} = (I_{\text{вmax}} \cdot w_{\text{в}}) / F_{\text{в}} ; I_{\text{вmax}} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} .$	
<b>3.3 Расчет обмоток при смешанном возбуждении</b>	
<p>3.3.1 Необходимое значение МДС</p> $F_{\text{н}} = F_{\text{в}} + F_{\text{пс}} ,$ $F_{\text{в}} = F_{\Sigma} + F_{\text{qd}} - F_{\text{пс}} .$	
<p>3.3.2 Значение МДС последовательной стабилизирующей обмотки</p> $F_{\text{пс}} \approx F_{\text{qd}} .$	
<p>3.3.3 Число витков последовательной стабилизирующей обмотки на один полюс</p> $w_{\text{пс}} = \frac{F_{\text{пс}} \cdot a_{\text{с}}}{I} ,$ $a_{\text{с}} = 1 .$	<p>Число витков округляется <math>w_{\text{пс}} =</math> .</p> <p>Уточняем <math>F_{\text{пс}} = I \cdot w_{\text{пс}} =</math> .</p>
<p>3.3.4 Предварительное сечение проводников стабилизирующей обмотки</p> $q_{\text{с}} = \frac{I}{a_{\text{с}} \cdot J_{\text{с}}} , M^2 ; J_{\text{с}} = J_{\text{в}} .$ <p>Поперечное сечение проводников <math>q_{\text{с}}</math> нормируется /1, ПЗ.1, ПЗ.1/.</p>	<p>Принимаем <math>q_{\text{с}} =</math> .</p>
<p>3.3.5 Средняя длина витка стабилизирующей обмотки</p> $l_{\text{ссп}} = l_{\text{всп}} .$	
<p>3.3.6 Сопротивление стабилизирующей обмотки</p> $R_{\text{с}} = m_{\text{т}} \cdot \rho \cdot \frac{2p \cdot w_{\text{пс}} \cdot l_{\text{ссп}}}{(a_{\text{с}})^2 \cdot q_{\text{с}}} , Ом .$	
<p>3.3.7 Масса меди стабилизирующей обмотки</p> $M_{\text{с}} = m_{\text{м}} \cdot 2p \cdot w_{\text{пс}} \cdot l_{\text{ссп}} \cdot q_{\text{с}} , кг .$	
<p>3.3.8 МДС обмотки параллельного возбуждения</p> $F_{\text{в}} = F_{\Sigma} + F_{\text{qd}} - F_{\text{пс}} .$	
<p>3.3.9 Поперечное сечение проводников параллельной обмотки возбуждения</p> $q_{\text{в}} = \frac{m_{\text{т}} \cdot \rho \cdot k_{\text{зап}} \cdot 2p \cdot F_{\text{в}} \cdot l_{\text{всп}}}{a_{\text{в}} \cdot U_{\text{в}}} , M^2 .$ <p>Поперечное сечение проводников <math>q_{\text{в}}</math> нормируется /1, ПЗ.1, ПЗ.2/.</p>	<p>Принимаем <math>q_{\text{в}} =</math> .</p>

Окончание табл. 6	
3.3.10 Число витков на один полюс $w_B = \frac{F_B \cdot a_B}{I_B},$ $I_B = J_B \cdot q_B \cdot a_B; \quad J_B = \quad /1, \text{ стр. 632}/.$	Число витков округляется $w_B = \quad$ .
3.3.11 Сопротивление обмотки возбуждения $R_B = m_t \cdot \rho \cdot \frac{2p \cdot w_B \cdot l_{вср}}{(a_B)^2 \cdot q_B}, \text{ Ом.}$	
3.3.12 Масса меди обмотки возбуждения $M_B = m_M \cdot 2p \cdot w_B \cdot l_{вср} \cdot q_B, \text{ кг.}$	
3.3.13 Коэффициент запаса $k_{зап} = (I_{вmax} \cdot w_B) / F_B; \quad I_{вmax} = \frac{U_B}{R_B}.$	

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 5. ОЦЕНКА КОММУТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цель практической работы 5. Ознакомление с методикой расчета коммутационных параметров электрических машин постоянного тока.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 7, где приводится методика выполнения расчетов.

Таблица 7

<b>4.1 Расчет коммутационных параметров</b>	
4.1.1 Окружная скорость якоря $V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_n}{60}.$	
4.1.1 Коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния для овального паза $\lambda_p = 0,6 \cdot \frac{h_n}{2 \cdot r_2} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + \frac{l_l}{l_\delta} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_c \cdot l_\delta \cdot A \cdot V_a} \cdot \frac{a}{p}.$	
4.1.3 Значение реактивной ЭДС $E_p = 2 \cdot w_c \cdot V_a \cdot A \cdot l_\delta \cdot \lambda_p \cdot 10^{-6}.$ /2, табл. 15/.	
<b>4.2 Расчет щеточно-коллекторного узла</b>	
4.2.1 Ширина щетки $b_{щ} = \gamma \cdot t_k; \gamma = (2 \dots 4)$ . $b_{щ}$ нормируется /1, П4.1/.	Ширина щетки $b_{щ} = \quad$ . Марка щеток _____

4.2.2 Ширина зоны коммутации $b_{зк} = \left( \frac{b_{щ}}{t_k} + u_{п} - \frac{a}{p} +  \varepsilon  \right) \cdot t_k \cdot \frac{D}{D_k} ;$ $\varepsilon = \frac{K}{2p} - y_1 .$	
4.2.3 Коэффициент зоны коммутации $k_{зк} = \frac{b_{зк}}{\tau - b_p} ; \quad k_{зк} = (0,55 \dots 0,75).$	
4.2.4 Контактная площадь щеток на один щеточный болт $S_{щ} = \frac{I}{p \cdot J_{щ}} ; \quad J_{щ} = \quad /1, П4.2/.$	
4.2.5 Длина щетки $l_{щ} = \frac{S_{щ}}{N_{щ} \cdot b_{щ}} ; N_{щ} \geq 2 .$ $l_{щ}$ нормируется /1, П4.1/.	Длина щетки $l_{щ} = \quad .$
4.2.6 Уточняется плотность тока под щеткой $J_{щ} = \frac{I}{p \cdot N_{щ} \cdot b_{щ} \cdot l_{щ}} .$	
4.2.7 Активная длина коллектора $L_k = N_{щ} \cdot (l_{щ} + 0,008) + (0,01 \div 0,025) .$	
<b>4.3 Расчет магнитной цепи добавочных полюсов</b>	
4.3.1 Воздушный зазор под добавочным полюсом $\delta_d = (1,5 \dots 2,0) \cdot \delta .$	
4.3.2 ЭДС коммутации $E_k = (1,05 \dots 1,1) \cdot E_p .$	
4.3.3 Индукция под добавочным полюсом $B_{\delta d} = \frac{E_k}{2 \cdot w_c \cdot V_a \cdot l_{\delta}} .$	
4.3.4 Магнитный поток в воздушном зазоре под добавочным полюсом $\Phi_{\delta d} = B_{\delta d} \cdot (b_{дн} + 2 \cdot \delta_d) \cdot l_{дн} ,$ $b_{дн} = k_{зк} \cdot b_{зк} ; \quad l_{дн} = l_{\delta} .$	
4.3.5 Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса $\Phi_d = \sigma_d \cdot \Phi_{\delta d} , \quad \sigma_d = \quad /1, стр. 638/.$	

Окончание табл. 7	
<p>4.3.6 Индукция в сердечнике добавочного полюса</p> $B_d = \frac{\Phi_d}{S_d},$ $S_d = b_d \cdot l_d \cdot k_c; \quad b_d \approx 0,05 \cdot D; \quad l_d \approx l_\delta.$	
<b>4.4 Расчет обмотки добавочного полюса</b>	
<p>4.4.1 Приближенное значение МДС обмотки добавочных полюсов</p> $F_d = (1,2 \dots 1,4) \cdot A \cdot \frac{\tau}{2}.$	Принимаем $F_d =$ .
<p>4.4.2 Число витков в обмотке добавочных полюсов</p> $w_d = \frac{F_d \cdot a_d}{I}, \quad a_d = 1.$	Число витков округляется $w_d =$ .
<p>4.4.3 Поперечное сечение проводников</p> $q_d = \frac{I}{a_d \cdot J_d}; \quad J_d = \quad /1, \text{ стр. 641}/.$ <p><math>q_d</math> нормируется /1, ПЗ.1, ПЗ.2/.</p>	Принимаем $q_d =$ .
<p>4.4.4 Средняя длина витка катушки добавочного полюса</p> $l_{дср} = 2 \cdot (b_d + l_d) + \pi \cdot (b_{кд} + 2 b_{из}),$ $b_{кд} = b_{кв}.$	
<p>4.4.5 Сопротивление обмотки добавочного полюса</p> $R_d = m_t \cdot \rho \cdot \frac{2p_d \cdot l_{дср} \cdot w_d}{(a_d)^2 \cdot q_d}; \quad 2p_d = 2p.$	
<p>4.4.6 Масса обмотки добавочного полюса</p> $M_d = m_m \cdot l_{дср} \cdot w_d \cdot 2p_d \cdot q_d.$	

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 6. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель практической работы 6. Получение практических навыков использования методики расчета потерь в электрических машинах постоянного тока.

Для удобства выполнения расчетов целесообразно использовать табл. 8, где приводится методика выполнения расчетов.

<b>5.1 Расчет потерь мощности</b>	
5.1.1 Механические потери мощности на трение щеток о коллектор $P_{\text{тщ}} = k_{\text{тр}} \cdot p_{\text{щ}} \cdot S_{\text{щ}} \cdot 2p \cdot V_{\text{к}},$ $k_{\text{тр}} = 0,25; \quad p_{\text{щ}} = \quad /1, \text{ П4.2}/.$	
5.1.2 Механические потери мощности на трение в подшипниках и механические потери мощности на вентиляцию $P_{\text{тп}} + P_{\text{вент}}, /1, \text{ рис. 11-28}/.$	
5.1.3 Механические потери мощности $P_{\text{мех}} = P_{\text{тщ}} + P_{\text{тп}} + P_{\text{вент}}.$	
5.1.4 Электрические потери в обмотке якоря $P_{\text{эа}} = I^2 \cdot R_{\text{а}}.$	
5.1.5 Электрические потери в обмотке добавочных полюсов $P_{\text{эд}} = I^2 \cdot R_{\text{д}}.$	
5.1.6 Электрические потери в последовательной стабилизирующей обмотке $P_{\text{эс}} = I^2 \cdot R_{\text{с}}.$	
5.1.7 Электрические потери мощности в параллельной обмотке возбуждения $P_{\text{эв}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{в}}.$	
5.1.8 Электрические потери мощности в щеточно-коллекторном контакте $P_{\text{эщ}} = 2\Delta U_{\text{щ}} \cdot I.$ $2\Delta U_{\text{щ}} = \quad /1, \text{ П4.2}/.$	
5.1.9 Основные электрические потери $P_{\text{э}} = P_{\text{эа}} + P_{\text{эд}} + P_{\text{эс}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{эщ}}.$	
5.1.10 Масса зубцов сердечника якоря $M_{\text{з}} = m_{\text{с}} \cdot Z \cdot b_{\text{з}} \cdot \left( h_{\text{п}} + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_{\delta} \cdot k_{\text{с}},$ удельная масса стали $m_{\text{с}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ .	
5.1.11 Масса ярма сердечника якоря $M_{\text{я}} = m_{\text{с}} \cdot \frac{\pi \cdot [(D - 2 \cdot h_{\text{п}})^2 - D_{\text{о}}^2]}{4} \cdot l_{\delta} \cdot k_{\text{с}}.$	
5.1.12 Магнитные потери в зубцах якоря $P_{\text{з}} = k_{\text{тех}} \cdot P_{\text{уд}} \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot B_{\text{з}}^2 \cdot M_{\text{з}}; \quad f = \frac{p \cdot n_{\text{п}}}{60},$ $k_{\text{тех}} = 2,3; \quad P_{\text{уд}} = \quad; \quad \beta = \quad /2, \text{ табл. 16}/.$	

5.1.13 Магнитные потери в ярме якоря $P_j = k_{\text{rex}} \cdot P_{\text{уд}} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_j^2 \cdot M_j .$	
5.1.14 Основные магнитные потери $P_M = P_z + P_j .$	
5.1.15 Добавочные потери мощности $P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot U_H \cdot I_H .$	
5.1.16 Суммарные потери мощности $P_\Sigma = P_{\text{мех}} + P_\omega + P_M + P_{\text{доб}} .$	
<b>5.2 Определение номинальных параметров</b>	
5.2.1 Предварительное значение потребляемой мощности $P_{1H} = P_H + P_\Sigma .$	
5.2.2 Предварительное значение тока двигателя $I_{1H} = \frac{P_{1H}}{U_H} .$	
5.2.3 Номинальный ток якоря $I_H = I_{1H} - I_B .$	
5.2.4 ЭДС обмотки якоря $E_H = U_H - I_H \cdot R_\Sigma - 2\Delta U_{\text{щ}} , \quad R_\Sigma =$ $R_\Sigma - \text{суммарное сопротивление якорной цепи.}$	
5.2.5 Основной магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta H} = \frac{60 \cdot a \cdot E_H}{N \cdot p \cdot n_H} .$	
5.2.6 По основной характеристике намагничивания $\Phi_\delta = f(F_\Sigma)$ определяется значение $F_{\Sigma H}$ , соответствующее $\Phi_{\delta H}$ .	
5.2.7 МДС системы возбуждения при параллельном возбуждении $F_B = F_{\Sigma H} + F_{\text{qдн}}$ при смешанном возбуждении $F_B = F_{\Sigma H} + F_{\text{qдн}} - F_{\text{псн}} ,$ $F_{\text{qдн}} = ; F_{\text{псн}} = .$	
5.2.8 Уточненный номинальный ток возбуждения $I_B = \frac{F_B \cdot a_B}{w_B} .$	



Окончание табл. 8	
5.2.8 Уточненный номинальный ток двигателя $I_{1н} = I_n + I_b .$	
5.2.9 Уточненное значение потребляемой мощности двигателя $P_{1н} = U_n \cdot I_{1н} .$	
5.2.11 Полезная мощность на валу двигателя $P_{2н} = E_n \cdot I_n - P_o - P_{доб} ,$ $P_o = P_{мех} + P_m .$	
5.2.12 Коэффициент полезного действия $\eta_n = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} .$	
5.2.13 Вращающий момент на валу двигателя $M_n = 9,57 \cdot \frac{P_{2н}}{n_n} .$	

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 7. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рабочие характеристики двигателя постоянного тока представляют собой зависимости скорости вращения  $n$ , потребляемого тока  $I$  и мощности  $P_1$ , момента на валу двигателя  $M$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при неизменном значении напряжения питания  $U_n = \text{const}$ , тока обмотки возбуждения  $I_{вн} = \text{const}$  и отсутствии добавочного сопротивления в якорной цепи  $R_{д я} = 0$ . Они дают возможность судить об эксплуатационных свойствах двигателей и определять наиболее экономичные их режимы работы в условиях производства.

Для удобства результаты расчета целесообразно представить в виде табл. 9.

Таблица 9

Расчет рабочих характеристик

Коэффициент нагрузки $k_n = \frac{I}{I_n} .$	0,1	0,25	0,5	0,75	1,25	1,5
Ток якоря для данных коэффициентов нагрузки $I = k_n \cdot I_n .$						
Значение ЭДС $E = U_n - I \cdot R_\Sigma - 2\Delta U_{щ} .$						

Размагничивающее действие реакции якоря $F_{qd} = k_n \cdot F_{qdn}$ .						
Суммарное магнитное напряжение всех участков магнитной цепи при параллельном возбуждении $F_{\Sigma} = F_B - F_{qd}$ ; при смешанном возбуждении $F_{nc} = k_n \cdot F_{псн}$ ; $F_{\Sigma} = F_B - F_{qd} + F_{nc}$ .						
Магнитный поток, соответствующий $F_{\Sigma}$ , определяется по характеристике намагничивания $\Phi_{\delta} = f(F_{\Sigma})$ .						
Частота вращения якоря $n = \frac{60 \cdot a \cdot E}{N \cdot p \cdot \Phi_{\delta}}$ .						
Ток двигателя $I_1 = I + I_B$ .						
Потребляемая мощность $P_1 = I_1 \cdot U_n$ .						
Полезная мощность на валу двигателя $P_2 = E \cdot I - P_o - P'_{доб}$ ; $P'_{доб} = k_{доб} \cdot P_{доб} \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$ ; $k_{доб} =$ /2, табл. 17/.						
Коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .						
Вращающий момент на валу двигателя $M = 9,57 \cdot \frac{P_2}{n}$ .						

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 8. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Цель практической работы 8. Получение практических навыков расчета теплового состояния машины постоянного тока

Таблица 10

<p>Расчетное сопротивление обмотки якоря</p> $R_{a,m} = R_a \cdot k_m$	
<p>Расчетное сопротивление обмотки добавочных полюсов</p> $R_{\delta,m} = R_{\delta} \cdot k_m$	
<p>Расчетное сопротивление обмотки смешанного возбуждения (в случае наличия)</p> $R_{c,m} = R_c \cdot k_m$	
<p>Расчетное сопротивление обмотки возбуждения</p> $R_{e,m} = R_e \cdot k_m$	
<p>Потери в обмотке якоря</p> $P_{a,m} = I_n^2 \cdot R_{a,m}$	
<p>Потери в обмотке добавочных полюсов</p> $P_{\delta,m} = I_n^2 \cdot R_{\delta}$	
<p>Потери в обмотке смешанного возбуждения</p> $P_{c,m} = I_n^2 \cdot R_{c,m}$	
<p>Потери в обмотке возбуждения</p> $P_{e,m} = I_{e,n}^2 \cdot R_{e,m}$	
<p>Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря над температурой воздуха внутри машины</p> $\Delta \vartheta_a = \frac{P_{a,m} \cdot \left( \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{a,cp}} \right) + P_{c,m}}{\pi \cdot D \cdot l_a \cdot \alpha_a}$	
<p>Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря</p> $\Delta \vartheta_{из,п} = \frac{P_{a,m} \cdot \left( \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{a,cp}} \right)}{Z \cdot \Pi_n \cdot l_{\delta} \cdot k_c} \cdot \left( \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda'_{эжв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{эжв}} \right)$ <p>где <math>\Pi_n</math>, м - периметр поперечного сечения паза</p> $\Pi_n = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot h_1$	
<p>Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря</p> $\Delta \vartheta_{пов,л} = \frac{P_{a,m} \cdot \left( 1 - \frac{l_{\delta}}{l_{a,cp}} \right)}{\pi \cdot D \cdot 2 \cdot l_{обл} \cdot \alpha_l}$ $l_{обл} = 0,4 \cdot \tau$	

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря

$$\Delta \vartheta_{из,л} = \frac{P_{a,m} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{a,ср}}\right)}{2 \cdot Z \cdot \Pi_{л} \cdot l_{л}} \cdot \frac{h_n}{8 \cdot \lambda_{экв}}$$

Где  $\Pi_{л}$ , м - периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части

$$\Pi_{л} = \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot (r_1 + r_2) + h_1$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха

$$\Delta \vartheta_{a,ср} = (\Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_{из,н}) \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{a,ср}} + (\Delta \vartheta_{пов,л} + \Delta \vartheta_{из,л}) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{a,ср}}\right)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя

$$\Delta \vartheta_{воз} = \frac{\Sigma P'}{S_{охл} \cdot \alpha_n}$$

где  $S_{охл}$  - условная поверхность охлаждения двигателя:

$$S_{охл} = \pi \cdot D_n \cdot (l_{\delta} + 2 \cdot l_{выл}),$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды

$$\Delta \vartheta'_{a,ср} = \Delta \vartheta_{a,ср} + \Delta \vartheta_{воз}$$

Превышение температуры наружной поверхности катушки возбуждения над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta_{n,в} = \frac{0,9 \cdot P_{в}}{2p \cdot l_{в,ср} \cdot \Pi_{в} \cdot \alpha_{в}}$$

Перепад температуры в изоляции катушки обмотки возбуждения

$$\Delta \vartheta_{из,в} = \frac{0,9 \cdot P_{в}}{2p \cdot l_{в,ср} \cdot \Pi_{в}} \cdot \left(\frac{b_{к,в,ср}}{8 \cdot \lambda_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right)$$

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды

$$\Delta \vartheta_{ср,в} = \Delta \vartheta_{n,в} + \Delta \vartheta_{из,в} + \Delta \vartheta_{воз}$$

Превышение температуры наружной поверхности катушки обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta_{n,д} = \frac{0,9 \cdot P_{д}}{2p_{д} \cdot l_{д,ср} \cdot \Pi_{д} \cdot \alpha_{д}}$$

Окончание табл. 10	
Перепад температуры в изоляции катушки обмотки добавочных полюсов $\Delta \vartheta_{из, \delta} = \frac{0.9 \cdot P_{\delta}}{2 p_{\delta} \cdot l_{\delta, cp} \cdot \Pi_{\delta}} \cdot \frac{b_{к, \delta}}{8 \cdot \lambda'_{экв}}$	
Среднее превышение температуры катушки обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды $\Delta \vartheta_{cp, \delta} = \Delta \vartheta_{н, \delta} + \Delta \vartheta_{из, \delta} + \Delta \vartheta_{воз}$	
Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta \vartheta_{к} = \frac{P_{э, ил} + P_{тр}}{S_{к} \cdot \alpha_{к}}$ Поверхность охлаждения коллектора $S_{к} = \pi \cdot D_{к} \cdot l_{к}$	
Среднее превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора $\Delta \vartheta_{к, cp} = \Delta \vartheta_{к} + \Delta \vartheta_{воз}$	

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 9. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

Цель практической работы 9 – получение практических навыков расчета объема воздуха, необходимого для охлаждения машины постоянного тока

Расчет выполняется в соответствии с алгоритмом /1, стр. 653-654/.

Таблица 11

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины $\Delta \vartheta'_{воз} \approx 2 \cdot \Delta \vartheta_{воз}$	
Необходимое количество охлаждающего воздуха $Q'_{воз} = \frac{\Sigma P'}{1100 \cdot \Delta \vartheta'_{воз}}$	
Наружный диаметр центробежного вентилятора $D_{2,6} \approx 0,9 \cdot d_c$ где $d_c$ - внутренний диаметр станины: $d_c = D_n - 2 \cdot h_c$	
Окружная скорость вентилятора по внешнему диаметру $v_2 = \frac{\pi \cdot D_{2,6} \cdot n}{60}$	
Внутренний диаметр колеса вентилятора $D_{1,6} = 1,25 \cdot D$	

Окончание табл. 11	
<p>Окружная скорость вентилятора по внутреннему диаметру</p> $v_1 = \frac{\pi \cdot D_{1,в} \cdot n}{60}$	
<p>Ширина лопаток вентилятора</p> $b_{л,в} = 0,13 \cdot D_{2,в}$	
<p>Число лопаток вентилятора</p> $N_{л} = (6 \div 10) \frac{D_{2,в}}{D_{2,в} - D_{1,в}}$	
<p>Давление вентилятора при холостом ходе составляет</p> $H_0 = \eta_{a,0} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2)$	
<p>Входное сечение вентилятора</p> $S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_{2,в} \cdot b_{л,в}$	
<p>Максимально возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания</p> $Q_{в,макс} = 0,42 \cdot v_2 \cdot S_2$	
<p>Действительный расход воздуха</p> $Q_{воз} = Q_{в,макс} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z \cdot Q_{в,макс}^2}}$	
<p>Действительное давление вентилятора</p> $H = \frac{H_0 \cdot Z \cdot Q_{в,макс}^2}{H_0 + Z \cdot Q_{в,макс}^2}$	
<p>Мощность, потребляемая вентилятором</p> $P_{вент} = \frac{H \cdot Q_{воз}}{\eta_э}$	
<p>Уточняем потери на трение в подшипниках</p> $P_{тр,п} = 0,25 \cdot P_{вент}$	
<p>Уточняем сумму потерь на трение в подшипниках и вентиляцию</p> $P_{тр,п} + P_{вент}$	
<p>Уточненное значение суммы механических потерь</p> $P_{мех} = P_{тр,ц} + P_{тр,п} + P_{вент}$	
<p>Пересчитаем полезную мощность на валу двигателя</p> $P_{2H} = E_H \cdot I_H - P_{мех} - P_m - P_{добH}$	
<p>Уточняем КПД машины в номинальном режиме</p> $\eta_n = \frac{P_2}{P_1}$	

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты расчетов, полученные в ходе выполнения практических работ необходимо оформить в виде расчетно-пояснительной записки, согласно требованиям СТП ВГТУ.

В курсовом проекте обязательно должны быть представлены все рисунки и схемы, использованные для проведения расчетов, а также схема обмотки якоря и рабочие характеристики.

По окончании расчетного проектирования необходимо провести конструкторскую проработку спроектированной машины, и по полученным геометрическим размерам, необходимо построить сборочный чертеж машины.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2014. - 767 с. - (Бакалавр).

2. Бурковская, Т. А. Проектирование электрических машин постоянного тока: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - Воронеж: Научная книга, 2008. - 128 с. - (Учебная серия "Открытое образование").

3. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: учебник / под ред. О. Д. Гольдберга. - 3-е изд., перераб. - М. : Высш. шк., 2006. - 430 с. : ил .

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям и курсовому проектированию  
по дисциплине «Проектирование электрических машин»  
для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электромеханика»)  
очной формы обучения

Составители: Черных Татьяна Евгеньевна  
Тикунов Алексей Владимирович

В авторской редакции

Компьютерный набор Т. Е. Черных

Подписано к изданию 27.10.2020.  
Уч.-изд. л. 1,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14