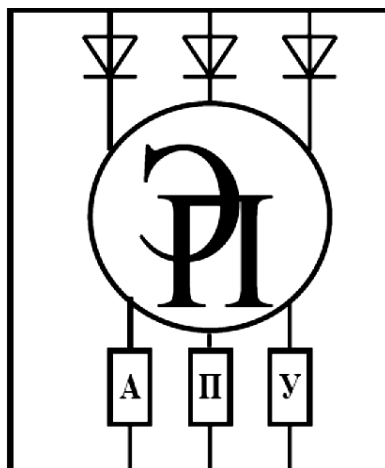


ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов направления подготовки 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
профиля подготовки  
«Электрооборудование автомобилей и тракторов»*



Могилев 2017

УДК 658.26  
ББК 31.19  
Э 01

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «08» сентября 2017 г.,  
протокол № 2

Составитель ст. преподаватель В. А. Лапицкий

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для  
выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины».

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	В. А. Лапицкий
Компьютерная верстка	В. А. Лапицкий

Подписано в печать 5.12.2017. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,33 . Уч.-изд. л. 2,55 . Тираж 50 экз. Заказ № 2356.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изделий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2017



## Введение

Электрические машины в общем объеме производства электротехнической промышленности занимают основное место, поэтому их технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства имеют важное значение для экономики страны.

Проектирование электрических машин представляет математически сложную задачу. Поэтому в процессе расчёта приходится задаваться некоторыми величинами, используя опыт проектирования подобных машин и экспериментальные данные.

Оптимизация электрических машин определяется минимумом стоимости материалов, затрат на изготовление и эксплуатацию. Стоимость эксплуатации зависит от КПД, коэффициента мощности, качества машины, ремонтоспособности и ряда других факторов.

Выбрать оптимальный вариант производства электрической машины можно, сопоставив многие варианты расчета, поэтому без вычислительных машин не обходится ни один серьезный расчет электрических машин. В настоящее время ЭВМ применяют для выполнения полного оптимизационного расчета электрической машины, ведутся работы по созданию системы автоматизированного проектирования электрических машин, которая должна не только выполнять расчет машины, но и выдавать рабочие чертежи. Предполагается, что в будущем автоматизированные системы проектирования будут выполнять работу от приема заказа на проектирование до испытания без ее изготовления (прогнозирование геометрии, надежности и характеристик).

Сопоставление программ расчетов, накопление банков данных, решение вопросов создания автоматизированной системы проектирования электрических машин - одни из трудных и важных задач электротехнической науки. Но прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться проектировать машину. Для этого надо уметь проводить электромагнитный, тепловой, механический и экономический расчеты машины. Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования. Оптимальное проектирование электрических машин можно представить как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений.

Выбор оптимальных параметров затрудняется сложностью алгоритма расчета электрической машины по формулам проектирования. При проектировании необходимо учитывать стоимость машины, надежность и технологичность конструкции. Эти показатели косвенно входят в формулы проектирования, что затрудняет оптимизацию. Оптимальные варианты электрической машины выбираются на основании широкого применения вычислительных машин, опыта и интуиции проектировщика.



При оптимизации электрических машин важное значение имеет выбор критерия оптимизации. Выбор критерия оптимизации зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для специальных машин целесообразно выбирать минимум массы или минимальные габариты. Для электрической машины общего назначения в качестве критерия оптимизации принимают минимум приведенных затрат. Этот критерий широко применяется во многих странах. Приведенные затраты на электрическую машину в процессе производства и эксплуатации являются обобщающим экономическим показателем, включающим основные экономические эквиваленты основных технических характеристик. Нельзя найти универсальный критерий оптимальности. Действительно, минимальная масса машины обуславливает снижение энергетических показателей и ухудшение надежности. Наиболее очевидны противоречия между статическими и динамическими характеристиками. Для уменьшения времени пуска асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление обмотки ротора, что вызывает ухудшение энергетических показателей в установившемся режиме [3].

Проектирование электрических машин (ЭМ) включает в себя следующие этапы:

1. Составление технического задания. Выясняются основные требования, предъявляемые заказчиком к электрической машине, соответствие техническим условиям или стандартам, если таковые имеются.

2. Предварительный расчёт основных размеров электрической машины и их соответствие техническому заданию.

3. Предварительный расчёт характеристик машины и оценка её нагрева. Анализируются результаты расчётов различных вариантов и производится выбор наиболее соответствующего выбранному критерию оптимальности.

4. Уточнение конструкции электрической машины, исходя из результатов предыдущего этапа. Полученные материалы являются основой для составления эскизного проекта машины.

5. Изготовление и испытание опытных образцов электрической машины.

6. Корректировка расчётов, размеров и параметров машины с учётом результатов испытаний и составление технического проекта.

7. Выпуск опытной партии электрических машин и составление соответствующей технической документации.

Одновременно с указанными этапами работы производится разработка технологической документации, определяются требования к используемым материалам и комплектующим изделиям. При этом технологический отдел конструкторского бюро осуществляет привязку технологического процесса к существующему оборудованию или разрабатывает задание на технологическое оборудование.



## 1 Пояснительная записка и графическая часть проекта

При выполнении пояснительной записки обязательному рассмотрению и отражению подлежат следующие разделы.

Введение.

1. Описание конструкции и технологии сборки электродвигателя.
2. Выбор главных размеров электродвигателя.
3. Электромагнитный расчёт электродвигателя.
4. Расчёт рабочих характеристик электродвигателя.
5. Тепловой и вентиляционный расчёт электродвигателя.
6. Механический расчёт электродвигателя.
7. Экономический расчёт электродвигателя.

Заключение.

Список литературы.

Приложения.

Рекомендуемый объем пояснительной записки 45–50 листов, из расчета, что записка отпечатана на принтере, шрифт *Courier New 10*, допускается применение других шрифтов.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4, оформление в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

Графическая часть проекта выполняется на двух листах формата А1.

На первом листе выполняется сборочный чертеж электродвигателя;

На втором листе выполняются следующие документы:

- 1) схема обмотки якоря электродвигателя;
- 2) графики рабочих характеристик;

Для оптимального использования полезного места форматов, допускается другое распределение документов. Оформление в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

Исходными данными для проектирования являются следующие данные: полезная мощность  $P_n$ , Вт; номинальное напряжение  $U_n$ , В; частота вращения  $n_n$ , об/мин; способ возбуждения – последовательное, параллельное, постоянные магниты; режим работы – продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный; исполнение – закрытое, защищённое.

Проект машины должен содержать: исходные данные для проектирования, данные расчётов и графическую часть. Последняя включает в себя общий вид и разрез машины, чертеж статора и якоря, чертеж паза в разрезе с обмоткой и изоляцией, развёрнутую схему обмотки якоря, рабочие характеристики ЭМ. Расчёт габаритов, параметров и величин, характеризующих МПТ, производится с использованием системы СИ.



## 2 Методические рекомендации

Техническое задание на учебное проектирование двигателя постоянного тока содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы, исполнении по способу монтажа, степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТам.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету.

Для уменьшения магнитных потерь магнитопровод якоря МПТ малой мощности набирается из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,2, 0,35 и 0,5 мм. Размеры якоря определяются мощностью машины, частотой вращения и режимом её работы.

Для определения размеров якоря используют расчётную (электромагнитную) мощность, которая зависит от ЭДС обмотки якоря.

Для двигателя постоянного тока

$$P_a = EI_a = U - I_a^2 R_a - \Delta U_{щ} I_a = \frac{P_n}{\eta_n} (\Delta P_m + \Delta P_{щ}), \quad (1)$$

где  $E$ ,  $I_a$  – ЭДС и ток якорной обмотки;

$U$  – напряжение, подводимое к двигателю;

$\Delta U_{щ}$  – падение напряжения в щётках;

$P_n$  – номинальная мощность двигателя;

$\eta_n$  – номинальный КПД двигателя;

$\Delta P_m$ ,  $\Delta P_{щ}$  – потери в якорной цепи и щётках двигателя при номинальном токе.

Потери в обмотке якоря и щётках для длительного режима можно принять равными 2/3 общих потерь двигателя:



$$\Delta P_M + \Delta P_{\text{щ}} \approx \frac{2}{3} \Delta P_{\Sigma} = \frac{2}{3} \frac{P_H}{\eta_H} (1 - \eta_H) \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – суммарные потери двигателя.

В этом случае расчётная мощность двигателя определяется следующим выражением:

$$P_a = \frac{1 + 2\eta_H}{3\eta_H} P_H. \quad (3)$$

В электродвигателях повторно-кратковременного или кратковременного режимов работы потери в меди обмотки и щётках составляют в среднем около 3/4 общих потерь. Поэтому для определения расчётной мощности используется формула

$$P_a = \frac{1 + 3\eta_H}{4\eta_H} P_H. \quad (4)$$

Значения КПД двигателя и генератора в зависимости от мощности и режима работы представлены в таблице 1.

Таблица 1 Значения КПД машин постоянного тока, %

P <sub>H</sub> , Вт	Режим		P <sub>H</sub> , Вт	Режим	
	длительный	кратковременный		длительный	кратковременный
10	38	30	200	63	52
20	45	38	300	66	56
30	50	42	400	70	58
40	53	45	500	72	60
50	55	47	600	74	62
60	57	48	700	75	63
70	58	49	800	76	64
80	59	50	900	77	65
90	60	51	1000	78	66
100	60	51			

Приведённые величины КПД являются ориентировочными и слабо влияют на габариты МПТ. Более точные значения КПД получаются после полного её расчёта.

Величина тока якоря рассчитывается по следующим выражениям:

а) для двигателя последовательного возбуждения

$$I_a = \frac{P_H}{U_{\eta_H}} \quad (5)$$

б) для двигателя параллельного возбуждения

$$I_a = \frac{P_H}{U_{\eta_H}} - I_B; \quad (6)$$

Предварительное значение тока возбуждения может быть принято равным 10 – 20% от величины полного тока, причём большее значение – для машин меньшей мощности.

ЭДС обмотки якоря рассчитывается через ранее найденную расчётную мощность:

$$E = \frac{P_a}{I_a} \quad (7)$$

Машинную постоянную рассчитывают по уравнению

$$C = \frac{6,0}{\alpha B_\delta AS}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент полюсной дуги,  $\alpha = 0,6 - 0,7$ ;

$B_\delta$  – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;

$AS$  – линейная нагрузка якоря, А/м.

Величины магнитной индукции и линейной нагрузки зависят от мощности и скорости вращения якоря машины. Ориентировочные значения этих величин представлены в таблице 2.

Магнитная индукция и линейная нагрузка определяют габариты машины: чем больше эти величины, тем меньше её размеры. Однако при чрезмерных значениях магнитной индукции происходит сильное насыщение участков магнитопровода машины, возрастает МДС обмотки возбуждения и, следовательно, увеличиваются размеры машины. Кроме того, происходит интенсивный нагрев магнитопровода и снижение КПД машины.

При чрезмерных значениях линейной нагрузки увеличивается реактивная ЭДС коммутируемых секций, что вызывает ухудшение коммутации МПТ. Помимо этого значительно возрастает поток поперечной реакции якоря, вследствие чего может произойти перемагничивание полюса. Для исключения этого явления приходится увеличивать воздушный зазор машины и габариты обмотки возбуждения. Для крупных МПТ значения магнитной индукции составляют 0,5-1,0 Тл, линейной нагрузки – до 10000 – 60000 А/м.

Отношение длины якоря  $l_0$  к его диаметру  $D_a$  изменяется в широком диапазоне:

$$\xi = l_0 / D_a = 0,4 - 1,6. \quad (9)$$

Если рассчитывается серия машин с одним и тем же диаметром, то величина этого отношения может достигать 2,0 – 2,5. Чаще всего  $\xi$  принимается равным 0,8 – 1,2.





Таблица 2 Магнитная индукция и линейная нагрузка для машин постоянного тока малой мощности

$\frac{P_H}{n_H}$ , Вт/об/мин	Магнитная индукция, Тл		Линейная нагрузка, А/м	
	Длительный режим	Кратковременный режим	Длительный режим	Кратковременный режим
$1 \cdot 10^{-3}$	0,22	0,245	40 – 50	80
$2 \cdot 10^{-3}$	0,26	0,29	50 – 60	100
$3 \cdot 10^{-3}$	0,275	0,33	60 – 68	115
$4 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,34	63 – 73	122
$5 \cdot 10^{-3}$	0,31	0,35	68 – 80	130
$6 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,36	70 – 82	139
$7 \cdot 10^{-3}$	0,33	0,37	71 – 82	143
$8 \cdot 10^{-3}$	0,335	0,38	72 – 82	148
$9 \cdot 10^{-3}$	0,34	0,39	85-88	152
$1 \cdot 10^{-2}$	0,35	0,41	90	155
$2 \cdot 10^{-2}$	0,37	0,44	110	162
$4 \cdot 10^{-2}$	0,40	0,47	115	175
$6 \cdot 10^{-2}$	0,43	0,49	118	183
$8 \cdot 10^{-2}$	0,45	0,51	120	195
$10 \cdot 10^{-2}$	0,46	0,53	121	202
$12 \cdot 10^{-2}$	0,465	0,54	123	207
$14 \cdot 10^{-2}$	0,47	0,55	125	212
$16 \cdot 10^{-2}$	0,47	0,55	125	219

При выборе величины  $\xi$  необходимо учитывать, что в коротких машинах уменьшается величина реактивной ЭДС и, следовательно, улучшаются условия коммутации. Однако, исходя из экономических соображений, относительную длину якоря стремятся увеличить, так как стоимость коллектора и подшипников практически не зависит от длины машины, а минимум меди якорной обмотки достигается при приближении  $\xi$  к 1,5. Если же машина должна иметь пониженный момент инерции якоря, то относительную длину приходится принимать выше указанного значения.

Выбрав величину  $\xi$ , рассчитывают диаметр якоря:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C P a}{\xi n_H}} \quad (10)$$

Тогда длина якоря

$$l_0 = \xi D_a \quad (11)$$

Полученные значения округляют до ближайшего стандартного типоразмера (приложение, таблице 1).

Окружная скорость вращения якоря



$$V_a = \pi D_a n_H / 60. \quad (12)$$

Окружная скорость якоря МПТ малой мощности может достигать 20 – 25 м/с.

Полюсное деление

$$\tau = \pi D_a / 2p. \quad (13)$$

В машинах малой мощности число полюсов принимается, как правило, равным двум. При мощностях  $P_H \geq 200$  Вт магнитную систему выгоднее выполнять четырёхполюсной. При этом уменьшается поток полюса, и, следовательно, сечение, и масса магнитопровода машины. Уменьшается также масса меди якоря из-за уменьшения длины лобовых частей якорной обмотки. В результате этого снижается расход активных материалов машины. Вместе с тем с увеличением числа полюсов возрастает трудоёмкость изготовления машины вследствие уменьшения размеров её деталей. Кроме того, увеличивается напряжение между коллекторными пластинами, что обуславливает необходимость увеличения числа коллекторных пластин и диаметра коллектора. Тем не менее, в настоящее время наметилась тенденция к выполнению четырёхполюсных машин даже при сравнительно малых мощностях.

Расчётная полюсная дуга

$$b_o = \alpha \tau. \quad (14)$$

Увеличение коэффициента расчётной полюсной дуги  $\alpha$  приводит к уменьшению габаритов машины. При этом, однако, уменьшается межполюсное расстояние, что может привести к увеличению магнитного поля от главных полюсов в зоне коммутации и ухудшению процесса коммутации.

Частота перемагничивания стали якоря

$$f = \frac{p n_H}{60}. \quad (15)$$

Воздушный зазор МПТ малой мощности выбирается минимально возможным. Однако для того чтобы магнитное поле не изменяло знака на протяжении полюсной дуги, необходимо выполнение следующего условия:

$$AS b_o \leq (F_{\delta H} + F_{ZH}), \quad (16)$$

где  $F_{\delta H}$  и  $F_{ZH}$  – МДС воздушного зазора и зубцовой зоны МПТ при номинальном токе.

Принимая ориентировочно

$$F_{ZH} = (0,15 \div 0,25) F_{\delta H} \quad (17)$$

и учитывая соотношения, связывающие МДС и магнитную индукцию в воздушном зазоре, получим:



для электродвигателей с продолжительным режимом работы

$$\delta = 0,25 \frac{\tau AS}{B_{\delta}} 10^{-6}; \quad (18)$$

для электродвигателей с кратковременным режимом работы

$$\delta = 0,15 \frac{\tau AS}{B_{\delta}} 10^{-6}; \quad (19)$$

В МПТ малой мощности применяются простые петлевые обмотки при  $2p = 2$  и простые волновые при  $2p = 4$ . Кроме того, для машин малой мощности весьма перспективно применение постоянных магнитов, позволяющих уменьшить потребляемую из сети мощность за счёт отсутствия тока возбуждения, повысить КПД, а в ряде случаев уменьшить габариты машины.

Полезный поток одного полюса машины

$$\Phi = B_{\delta} b_0 l_0. \quad (20)$$

Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{60 a E}{\rho n_H \Phi}, \quad (21)$$

где  $a$  – число параллельных ветвей якорной обмотки машины (для машин малой мощности обычно,  $a = 1$ ).

При выборе числа пазов необходимо руководствоваться следующим. Слишком малое число пазов приводит к значительным пульсациям ЭДС машины, а слишком большое число – к уменьшению ширины зубцов и их насыщению. Необходимо учитывать также, что увеличение числа зубцов приводит к нерациональному использованию площади паза, так как при уменьшении размеров пазов площадь, занимаемая изоляцией, остаётся прежней. Предпочтение отдаётся нечётному числу, в этом случае уменьшаются пульсации поля под полюсами, вызывающие появление переменной ЭДС, ухудшающей коммутацию. Однако при нечётном числе пазов становится затруднительной машинная намотка якоря. Для МПТ малой мощности число пазов якоря

$$Z = (3 \div 4) D_a, \quad (22)$$

где  $D_a$  – диаметр якоря измерен в сантиметрах.

Число коллекторных пластин выбирается равным числу элементарных пазов исходя из соотношения:

$$K = Z_{\Theta} = u_{\Pi} Z, \quad (23)$$

где  $u_{\Pi}$  – число элементарных пазов в реальном пазу, выбирается таким образом, чтобы среднее напряжение между коллекторными пластинами не превышало допустимого значения:



$$U_{\text{ксп}} = \frac{2pU}{K} \leq 25 - 30 \text{ В.} \quad (24)$$

Обычно  $u_{\text{П}} = 2 - 3$ . В случае волновой обмотки при нечётном числе пазов якоря  $u_{\text{П}}$  должно быть числом нечётным, так как только при этом условии возможно выполнение симметричной обмотки с целым шагом.

Число витков в секции обмотки якоря

$$W_{\text{с}} = \frac{N}{2K}. \quad (25)$$

Число витков в секции должно быть целым. Поэтому рассчитанное по (25) значение округляется, а число проводников обмотки якоря соответствующим образом корректируется. Окончательные значения  $u_{\text{П}}$  и  $W_{\text{с}}$  принимаются после проверки коммутации, т.к. величина реактивной ЭДС, определяющей характер процесса коммутации, пропорциональна числу  $W_{\text{с}}$ .

Для простой петлевой обмотки шаги обмотки якоря

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon; \quad y_2 = y_1 - 1; \quad y = 1; \quad y_k = 1; \quad (26)$$

для простой волновой обмотки

$$y_k = \frac{K \pm 1}{2p}; \quad y = y_k; \quad y_1 = y_2 = y/2, \text{ если } y - \text{ чётное число;}$$

$$y_1 = \frac{y+1}{2}; \quad y_2 = \frac{y-1}{2}, \text{ если } y - \text{ нечётное число.}$$

После определения параметров якорной обмотки составляется таблица обхода и вычерчивается её схема.

Линейная нагрузка якоря принимается с учётом скорректированного числа проводников обмотки якоря

$$AS = \frac{NI_a}{2\pi D_a} \quad (27)$$

Полученная величина линейной нагрузки не должна отличаться от ранее принятой более чем на 5%. В противном случае в качестве исходного значения  $AS$  принимается найденное по (27) и производится повторный расчёт.

В МПТ малой мощности часто используются пазы круглой, овальной и трапецеидальной формы. Наиболее технологичны и просты в изготовлении пазы круглой формы. Поэтому, если площадь круглого паза соответствует расчёту, то при всех прочих равных условиях предпочтение отдаётся круглому пазу. Овальная и трапецеидальная формы паза увеличивают



его площадь по сравнению с пазом круглой формы при том же диаметре якоря.

Площадь паза якоря зависит от количества и сечения проводников обмотки якоря. В свою очередь, сечение проводника определяется величиной тока якоря и его допустимой плотностью, которая зависит от режима работы машины, способа охлаждения, класса изоляции, коэффициента теплоотдачи.

Интенсивность нагрева МПТ определяется удельной тепловой нагрузкой ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), которая для продолжительного режима записывается в виде

$$q = \Theta_M \alpha (1 + 0,1 V), \quad (28)$$

где  $\Theta_M$  – предельно допустимое превышение температуры корпуса над температурой окружающей среды, определяемое классом изоляции. Температура окружающей среды принимается при расчётах равной  $40^\circ \text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности якоря в неподвижной среде, составляющий в среднем  $14 - 18 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$  для машин закрытого исполнения без вентилятора и  $36 - 44 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$  для машин защищённого исполнения с встроенным вентилятором;

$V$  – окружная скорость якоря в машинах без вентилятора,  $V = V_a$ .

Работа встроенного вентилятора приводит к увеличению потока охлаждающего воздуха и, следовательно, к увеличению скорости его движения  $V$ :

$$V = (V_a^2 + V_b^2)^{1/2}, \quad (29)$$

где  $V_b$  – окружная скорость лопаток вентилятора,

$$V_b = \pi D_b n_n / 60; \quad (30)$$

$D_b$  – диаметр колеса центробежного вентилятора,

$$D_b = (1,25 \div 1,4) D_a.$$

Удельная тепловая нагрузка для кратковременного режима работы

$$q = \frac{\Theta_M \alpha (1 + 0,1 V)}{f(t_p / T_p)}, \quad (31)$$

здесь  $t_p$  – время работы двигателя, с;

$T_p$  – постоянная времени нагрева вращающегося якоря, с ,

$$T_p \approx \frac{936 D_a}{\alpha (1 + 0,1 V)} 10^3. \quad (32)$$

$$f(t_p / T_p) = 1 - \exp(-t_p / T_p). \quad (33)$$

Для МПТ, работающих в повторно-кратковременном режиме,



$$q = \frac{\Theta_M \alpha (1 + 0,1 V)}{f(t_p / T_p) \Psi(t_p / T_p)}, \quad (34)$$

где функция  $\Psi(t_p / T_p)$  определена зависимостью времени работы машины и паузы:

$$\Psi(t_p / T_p) = 1 + \exp(-a_1 t_p / T_p) + \exp(-2 a_1 t_p / T_p) + \dots + \dots \exp[-(n-1) a_1 t_p / T_p], \quad (35)$$

где  $n$  – число циклов работы;

$$a_1 = \left( 1 + \frac{T_p}{T_{\Pi}} \frac{t_{\Pi}}{t_p} \right); \quad (36)$$

$T_{\Pi}$  – постоянная времени охлаждения неподвижного якоря, с;

$t_{\Pi}$  – время паузы, с.

Выражая потери в якорной цепи машины через линейную нагрузку и плотность тока в проводниках обмотки, можно получить выражение плотности тока при заданной линейной нагрузке и допустимом превышении температуры  $\Theta_M$ :

а) для МПТ при  $2p = 2$  и  $n < 5000$  об/мин

$$J_a = \frac{17q}{AS} 10^6; \quad (37)$$

при  $5000 \leq n \leq 10000$  об/мин

$$J_a = \frac{14q}{AS} 10^6; \quad (38)$$

при  $10000 \leq n \leq 15000$  об/мин

$$J_a = \frac{12q}{AS} 10^6; \quad (39)$$

б) для МПТ при  $2p = 4$  и при  $n < 5000$  об/мин

$$J_a = \frac{13q}{AS} 10^6; \quad (40)$$

при  $5000 \leq n \leq 10000$  об/мин

$$J_a = \frac{11q}{AS} 10^6; \quad (41)$$

при  $10000 \leq n \leq 15000$  об/мин

$$J_a = \frac{10q}{AS} 10^6. \quad (42)$$

Предварительное сечение проводников обмотки якоря

$$S_a = \frac{I_a}{2J_a} \quad (43)$$



По полученному сечению рассчитывается диаметр провода (выбирается ближайшее его значение), марка и необходимый класс изоляции. Для выбранного провода определяется сечение и реальная плотность тока в якорной обмотке.

Предварительная величина площади паза якоря

$$S_{\text{п}} = \frac{S_{a.\text{из}} N_{\text{п}}}{K_{3.\text{п}}}, \quad (44)$$

где  $N_{\text{п}}$  – число проводников в пазу якоря,

$$N_{\text{п}} = N / Z; \quad (45)$$

$S_{a.\text{из}}$  – сечение изолированного проводника якорной обмотки,

$$S_{a.\text{из}} = \pi d_{\text{из}}^2 / 4, \quad (46)$$

$d_{\text{из}}$  – диаметр изолированного проводника обмотки якоря;

$K_{3.\text{п}}$  – коэффициент заполнения паза, предварительное значение которого принимается равным 0,30 – 0,46. При меньших значениях  $K_{3.\text{п}}$  заполнение паза будет "рыхлым", т.е. проводники обмотки будут подвижными. При больших значениях  $K_{3.\text{п}}$  выполнение обмотки становится невозможным, т.е. в пазу не удаётся разместить необходимое число проводников.

Размеры паза и зубцов. Рассчитав площадь паза, необходимо определить его размеры. Поскольку наиболее технологичным является круглый паз, проверяется возможность его реализации. Диаметр круглого паза

$$d_{\text{п}} = (4 S_{\text{п}} / \pi)^{0,5}. \quad (47)$$

Кроме того, необходимо учесть наличие щели паза, через которую производится укладка проводников обмотки. Высота щели  $h_{\text{щ}}$  обычно не превышает 1,0 – 1,5 мм, а её ширина  $b_{\text{щ}} = (2 - 8)d_{\text{из}}$ , причём больший размер для более тонких проводов. Приняв указанные размеры и определив число пазов и их диаметр, рисуют в масштабе эскиз якоря (рисунок 1).

Если необходимое число пазов удаётся разместить на листе якоря, то определяют размеры зубцов для трёх сечений.

Зубцовое деление якоря

$$t_Z = \pi D_a / Z. \quad (48)$$

Максимальная ширина зубца

$$b_{Z1} = t_Z - b_{\text{щ}}. \quad (49)$$

Ширина зубца в основании паза

$$b_{Z2} = t_2 = \frac{\pi [D_a - 2(d_{\text{п}} + h_{\text{щ}})]}{Z}. \quad (50)$$



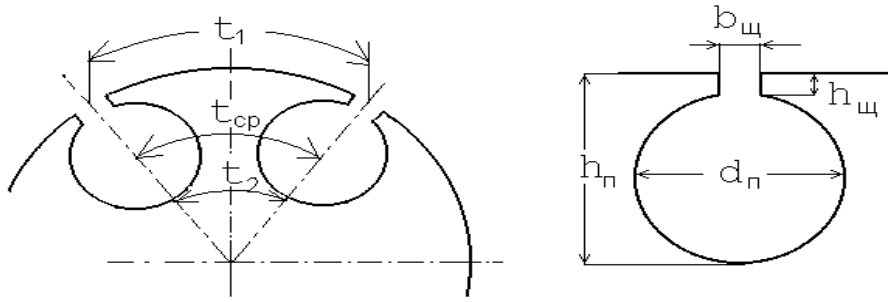


Рисунок1 - Паза якоря круглой формы

Ширина паза в среднем сечении

$$b_{z_{cp}} = t_{cp} - d_n = \frac{\pi [D_a - (d_n + h_{щ})]}{Z} - d_{п}. \quad (51)$$

Минимальную ширину зубца желательно проверить по величине магнитной индукции в этом сечении, исходя из того, что весь поток зубцового деления проходит через зубец:

$$B_{z_{м}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z_{cp}} K_{3.c}}, \quad (52)$$

где  $K_{3.c}$  – коэффициент заполнения стали. Его величина зависит от толщины листа и вида изоляции. Для современных сталей величина  $K_{3.c} = 0,95 - 0,97$ .

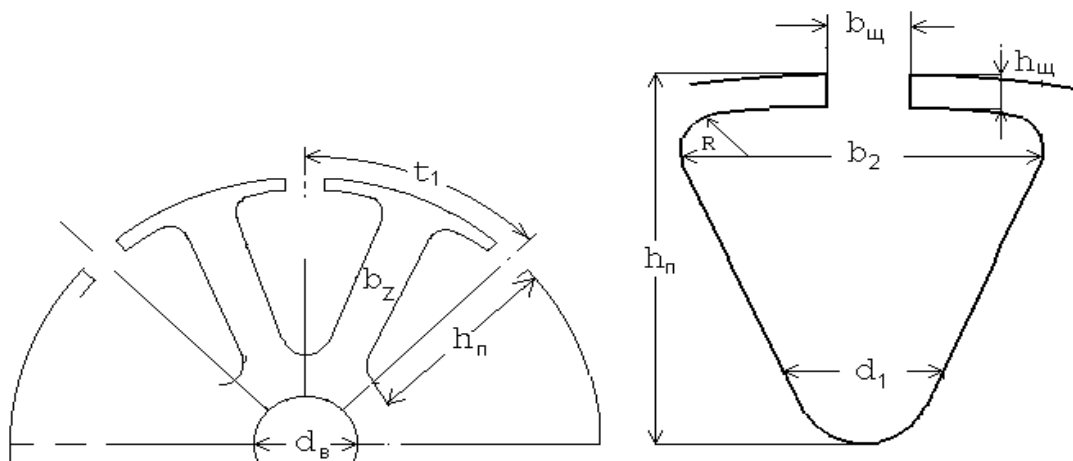


Рисунок2 - Паза якоря трапецидальной формы



Максимальная величина магнитной индукции в зубцах МПТ малой мощности не превышает 1,8 Тл, а ширина зубцов якоря по технологическим условиям штамповки должна быть не менее 1,5 мм.

На практике чаще всего реализовать круглый паз необходимой площади не удаётся. Поэтому наиболее распространены пазы якоря овальной или трапецеидальной формы (рисунок 2), позволяющие получать значительные площади паза при небольшой его ширине. Важным достоинством пазов указанной формы является постоянная ширина зубцов якоря, которая, как и в предыдущем случае, должна быть не менее 1,5 мм.

Ширина зубца может быть рассчитана исходя из допустимых значений магнитной индукции  $B_z$  по выражению (52).

Для определения размеров паза в крупном масштабе изображается лист якоря. При известном числе пазов окружность якоря разбивается на соответствующее число секторов, по осям которых в том же масштабе изображаются зубцы якоря необходимой ширины.

Ориентировочная высота паза рассчитывается по выражению

$$h_{\text{п}} = (D_a - d_{\text{в}} - 2 h_a), \quad (53)$$

$$h_{\text{п}} = (0,22 \div 0,3) D_a.$$

Диаметр вала МПТ

$$d_{\text{в}} = (0,18 \div 0,24) D_a.$$

Высота спинки якоря выбирается из допустимых значений магнитной индукции на этом участке:

$$h_a = \frac{\alpha \tau B_{\delta}}{2 K_{3,с} B_a}, \quad (54)$$

где  $B_a$  – магнитная индукция в спинке якоря, максимальная величина которой не должна превышать 1,5 Тл.

Таким образом, задаваясь величинами диаметра вала, спинки якоря и зная диаметр якоря, можно уточнить высоту паза  $h_{\text{п}}$ .

Максимальная и минимальная ширина овального паза может быть приближённо рассчитана по следующим выражениям:

$$b_{\text{п макс}} = \frac{3,14(D_a - 2h_{\text{п}}) - b_z Z}{Z + 3,14}, \quad (55)$$

$$b_{\text{п мин}} = \frac{3,14(D_a - 2h_{\text{п}}) - b_z Z}{Z - 3,14}, \quad (56)$$

а высота средней части паза

$$h_{12} = h_{\text{п}} - h_{\text{ш}} - b_{\text{п макс}} / 2 - b_{\text{п мин}} / 2. \quad (57)$$



По рисунку паза рассчитывается его площадь, которая корректируется исходя из условия размещения проводников в пазу. Так для трапециевидного паза

$$S_{\text{п}} = h_{12} \left( \frac{b_{\text{пмакс}} + b_{\text{пмин}}}{2} \right) + \frac{3,14}{8} \left( b_{\text{пмакс}}^2 + b_{\text{пмин}}^2 \right). \quad (58)$$

После этого можно уточнить размеры зубца якоря, в частности его ширину. Увеличение ширины зубца приводит к уменьшению его магнитной индукции, следовательно, уменьшению потерь в стали зубцов, уменьшению МДС обмотки возбуждения, её веса и габаритов.

При  $2p = 2$  средняя длина проводников обмотки якоря

$$l_a = l_0 + 1,2 D_a; \quad (59)$$

при  $2p = 4$

$$l_a = l_0 + 0,8 D_a. \quad (60)$$

В нагретом состоянии сопротивление обмотки якоря

$$R_a = K_{\Theta} \frac{NI_a}{4\gamma_M S_a}. \quad (61)$$

В этом выражении  $\gamma_M = 57 \cdot 10^6 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  – электропроводность меди при температуре окружающей среды. Температурный коэффициент меди

$$K_{\Theta} = 1 + 0,004 (\Theta - \Theta_{\text{окр}}), \quad (62)$$

где  $\Theta$  – рабочая температура;

$\Theta_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды,  $\Theta_{\text{окр}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_a = I_a R_a. \quad (63)$$

Величина  $\Delta U_a$  составляет обычно 10 – 20% от номинального напряжения. Меньшие значения относятся к машинам с высокими номинальными напряжениями  $U_{\text{ан}} > 110 \text{ В}$ , работающим в длительном режиме.

В настоящее время коллекторы машин малой мощности выполняются чаще всего с пластмассовой изоляцией. Коллекторные пластины изготавливаются из твёрдотянутой меди трапециевидального сечения с впадинами в виде «ласточкина гнезда» (рисунок 3).

В некоторых конструкциях коллекторные пластины изолируются друг от друга миканитовыми прокладками толщиной 0,6 – 0,8 мм, чаще для изоляции используется та же пластмасса, что и для крепления коллекторных пластин.



Более совершенными технологиями изготовления коллекторов являются малоотходные, с использованием цельных заготовок из листов меди или медного порошка.

Толщина кольца коллектора выбирается с учётом износа коллектора и дальнейшей его проточки и составляет

$$\Delta_K = (0,1 \div 0,2) D_K .$$

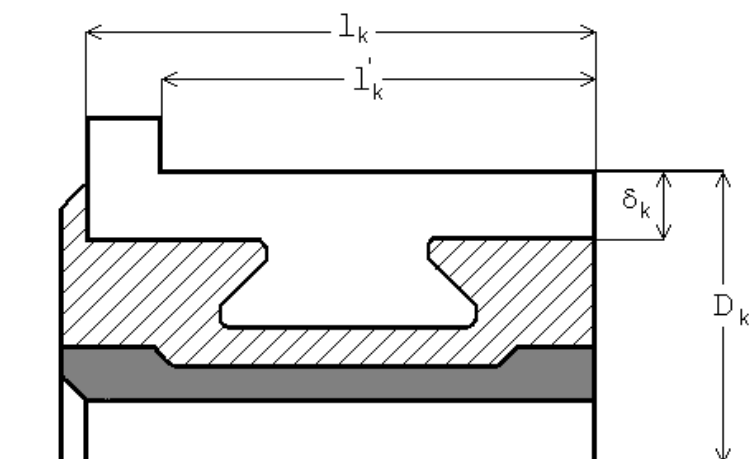


Рисунок 3 - Коллектор машины постоянного тока

Коллектор должен быть изолирован от вала машины. Для этой цели также используется изолирующая пластмасса.

Щётки и прижимные пружины размещаются в трубчатых или коробчатых щёткодержателях.

Различают радиальные и реактивные щёткодержатели. В радиальных щёткодержателях щётка располагается перпендикулярно поверхности коллектора, в реактивных – под некоторым углом по ходу вращения коллектора, обеспечивая при этом более надёжный контакт. Реактивные щёткодержатели обычно применяются в нереверсивных МПТ, имеющих одно направление вращения.

Предварительный диаметр коллектора

$$D_K = (0,5 \div 0,9) D_a .$$

В машинах малой мощности ширина коллекторной пластины  $b_K$  принимается равной 2–5 мм. Толщина изоляции между коллекторными пластинами  $b_{из} = 0,6 - 0,8$  мм.

Деление по коллектору

$$t_K = 3,14 D_K / k \quad (64)$$

Для правильно спроектированного коллектора должно выполняться соотношение

$$t_k = b_k + b_{из}. \quad (65)$$

Ширина коллекторной пластины при этом должна соответствовать ГОСТ 4134–75. Определив  $t_k$ , уточняют диаметр коллектора, используя выражение (64).

Окружная скорость коллектора

$$V_k = \pi D_k n / 60. \quad (66)$$

В МПТ малой мощности для улучшения коммутации наиболее часто используются твёрдые медно-графитовые или электрографитные щётки, которые меньше подвержены износу, что увеличивает надёжность работы машины.

Размеры щёток выбираются исходя из допустимой для каждого типа щёток плотности, которая лежит в широких пределах: 4,0 – 20,0 А/см<sup>2</sup> (наиболее часто 10,0 – 15,0 А/см<sup>2</sup>). Тогда, выбрав тип щёток и определив допустимую для них плотность тока  $J_{щ}$ , можно рассчитать площадь щётки:

$$S_{щ} = \frac{I_a}{\rho J_{щ}} \quad (67)$$

С другой стороны,

$$S_{щ} = a_{щ} b_{щ}, \quad (68)$$

где  $a_{щ}$  – осевая ширина щётки;

$b_{щ}$  – ширина щётки по окружности коллектора, ориентировочно принимается

$$b_{щ} = (2 \div 3) b_k. \quad (69)$$

Выбрав стандартный размер ширины щётки  $b_{щ}$  (ГОСТ 122322.1-77), определяют осевой размер щётки  $a_{щ}$ , удовлетворяющий необходимой площади. Осевая длина щётки также должна соответствовать указанному стандарту. После определения размеров щёток уточняют получаемую при этом плотность тока, используя выражение (67). Величина плотности не должна превосходить допустимого значения для выбранного типа щёток.

Активная длина коллектора по оси вала

$$l'_k = (1,5 \div 2,0) a_{щ}. \quad (70)$$

Полная длина коллектора

$$l_k = l'_k + (3 \div 5) d_a, \quad (71)$$

где  $d_a$  – диаметр проводника обмотки якоря без изоляции.

Проверка коммутации. В МПТ малой мощности добавочные полюса не выполняются, а щётки устанавливаются строго на линии геометриче-



ской нейтрали. Вследствие этого в коммутируемых секциях наводится реактивная ЭДС  $e_R$  и ЭДС от поля реакции якоря  $e_a$ , которая также замедляет процесс коммутации. Наличие этих ЭДС приводит к увеличению плотности тока под сбегающим краем щёток и, следовательно, к повышенному искрению. Интенсивность искрения зависит от величины суммарной ЭДС в коммутируемой секции, которая не должна превосходить определённого значения.

$$e_p = e_R + e_a, \quad (72)$$

Среднее значение реактивной ЭДС в коммутируемой секции определяется выражением

$$e_R = 2 W_C \lambda AS l_0 V_a. \quad (73)$$

Удельная магнитная проводимость потоков рассеяния  $\lambda$  для пазов овальной и трапецеидальной формы определяется выражением

$$\lambda = \left[ 0,6 \frac{2 h_{\Pi}}{b_{\Pi 1} + b_{\Pi 2}} + \frac{l_a - l_0}{l_0} + 0,92 \lg \left( \frac{\pi t_1}{b_{\text{щ}}} \right) \right] 10^{-6}, \quad (74)$$

где  $b_{\Pi 1}$  и  $b_{\Pi 2}$  – максимальная и минимальная ширина паза.

ЭДС от реакции якоря при установке щёток на линии геометрической нейтрали

$$e_a = \frac{\mu_0 W_C AS \tau l_0 V_a}{\delta_a}, \quad (75)$$

где  $\delta_a$  – средняя длина магнитной силовой линии в межполюсном пространстве,

$$\delta_a = \frac{\tau - b_0}{2}. \quad (76)$$

Для благоприятной коммутации МПТ малой мощности необходимо, чтобы величина результирующей ЭДС  $e_p$  в коммутируемой секции не превышала 1,5 В. В случае невыполнения этого условия необходимо либо уменьшить число витков в секции, либо уменьшить величину линейной нагрузки, сохранив при этом габариты машины за счёт увеличения магнитной индукции в воздушном зазоре.

На процесс коммутации может оказывать влияние магнитное поле полюсов, величина которого в зоне коммутации теоретически должна быть равной нулю. Однако если ширина зоны коммутации близка к расстоянию между полюсными наконечниками соседних полюсов, то в зоне коммутации будет ощущаться влияние их магнитного поля. Для того чтобы исключить это влияние, необходимо ограничить ширину коммутационной зоны  $b_K$  до определённых размеров:



$$b_k = b'_{щ} + \left[ u_{п} + \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{\rho} \right] t'_k, \quad (77)$$

где  $b'_{щ}$  – ширина щётки, приведённая к окружности якоря,

$$b'_{щ} = b_{щ} \frac{D_a}{D_k}; \quad (78)$$

$t'_k$  – коллекторный шаг, приведённый к диаметру якоря,

$$t'_k = t_k \frac{D_a}{D_k}. \quad (79)$$

Для благоприятной коммутации необходимо

$$b_k \leq 0,8 (\tau - b_0). \quad (80)$$

Магнитопровод МПТ малой мощности изготавливается чаще всего шихтованным из электротехнической стали, причём полюса выполняются заодно с ярмом статора. Значительно реже магнитопровод статора изготавливается сплошным из труб малоуглеродистой стали. Полюса машины в этом случае изготавливаются отдельно, также из мягкой малоуглеродистой стали. В последнее время полюса прессуются из порошковых ферромагнитных материалов. Магнитопровод якоря для уменьшения потерь во всех случаях выполняется шихтованными из малокремнистых электротехнических сталей.

Определение геометрических размеров.

Воздушный зазор:

$$\delta' = K_{\delta} \delta, \quad (81)$$

где  $K_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера),

$$K_{\delta} = \frac{t_z + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta}. \quad (82)$$

Высота сердечника полюса  $h_{пл}$  предварительно принимается равной  $(0,24 \div 0,4) D_a$ . Полученное значение  $h_{пл}$  должно быть уточнено после расчёта обмотки возбуждения исходя из необходимой площади окна для размещения обмотки.

Осевая длина полюса для МПТ малой мощности обычно равна длине якоря:

$$l_{пл} = l_0. \quad (83)$$

Магнитная индукция в сердечнике полюсов принимается равной 1,2 – 1,5 Тл для машин, работающих в длительном режиме, и 1,4 – 1,6 Тл для машин с кратковременным режимом работы. Исходя из этих значений, рассчитывается сечение сердечника полюса

$$S_{\text{пл}} = \frac{\Phi_0 \sigma}{B_{\text{пл}}}, \quad (84)$$

где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния магнитного потока с учетом того, что помимо основного магнитного потока по сердечнику полюса проходит поток рассеяния. Величина этого коэффициента составляет 1,08 – 1,12.

Рассчитав площадь сердечника полюса, определяют его ширину:

$$b_{\text{пл}} = \frac{S_{\text{пл}}}{l_{\text{пл}} K_{3.с}}. \quad (85)$$

Если полюс выполнен сплошным, то коэффициент заполнения стали  $K_{3.с} = 1,0$ .

Сечение магнитопровода станины рассчитывается исходя из допустимых значений магнитной индукции  $B_{\text{ст}}$  на этом участке, которые принимаются равными 1,2 – 1,4 Тл для длительного режима работы машины и до 1,5 Тл для кратковременного режима. Магнитный поток, замыкающийся через станину, равен половине потока полюса, отсюда

$$S_{\text{ст}} = 0,5 \frac{\Phi_0 \sigma}{B_{\text{ст}}}. \quad (86)$$

Большие значения индукции рекомендуются для машин с кратковременным режимом работы.

Высота сердечника станины

$$h_{\text{ст}} = \frac{S_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}} K_{3.с}}. \quad (87)$$

Длина станины  $l_{\text{ст}}$  принимается равной длине якоря для машин с шихтованной станиной и  $l_{\text{ст}} = l_0 + (3 - 5)$  мм для машин с отъемными полюсами. Для станин из литой стали  $K_{3.с} = 1,0$ .

После расчёта указанных размеров в масштабе рисуют эскиз магнитной цепи машины, по которому определяют длину отдельных участков магнитной цепи (рисунок 4).

МДС воздушного зазора

$$AW_{\delta} = 2 \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta K_{\delta}. \quad (88)$$

МДС зубцовой зоны рассчитывается исходя из предположения, что весь магнитный поток зубцового деления проходит через зубец. Если при этом использованы пазы прямоугольной формы, то ширина зубцов оказывается переменной и магнитная индукция в различных сечениях различна.



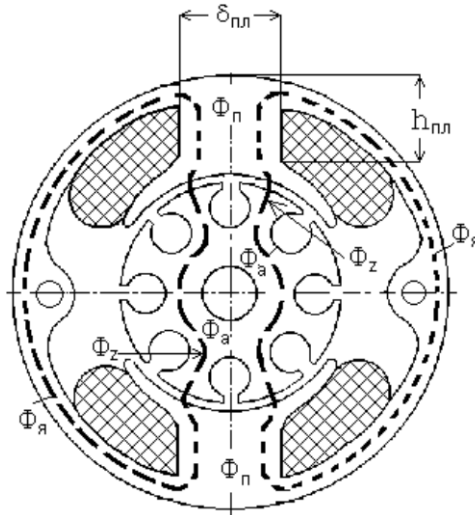


Рисунок 4 - Магнитная система машины постоянного тока

В этом случае расчёт МДС производится для трёх различных сечений зубца – максимального, среднего и минимального:

$$B_{z\text{мин}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z1} K_{3.c}}; \quad (89)$$

$$B_{z\text{ср}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z\text{ср}} K_{3.c}}; \quad (90)$$

$$B_{z\text{макс}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z2} K_{3.c}}; \quad (91)$$

Рассчитав значения магнитных индукций, по кривым намагничивания выбранного сорта электротехнической стали определяют соответствующие значения напряжённостей магнитного поля  $H_{z\text{мин}}$ ,  $H_{z\text{ср}}$ ,  $H_{z\text{макс}}$ .

При расчёте МДС зубцов необходимо скорректировать их ширину таким образом, чтобы максимальная величина магнитной индукции  $B_{z\text{макс}}$  не превышала 1,8 Тл.

МДС зубцовой зоны определяется по формуле Симпсона:

$$AW_z = 2 \frac{H_{z\text{мин}} + 4 H_{z\text{ср}} + H_{z\text{макс}}}{6} h_{\text{п}}. \quad (92)$$

Здесь принято, что высота зубца равна высоте паза.

Для машин малой мощности чаще всего используются пазы овальной или трапецеидальной формы. В этом случае ширина зубца во всех сечениях одинакова и расчёт значительно упрощается, так как магнитная индукция и напряжённость магнитного поля в любом сечении зубца оказываются одинаковыми:



$$B_{Z_{\text{макс}}} = \frac{B_{\delta} t_Z}{b_Z K_{3.с}}; \quad (93)$$

$$AW_Z = 2 H_Z h_{\text{п}}. \quad (94)$$

Уточнённое значение магнитной индукции в сердечнике якоря

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2 h_a l_0 K_{3.с}}. \quad (95)$$

По рассчитанному значению магнитной индукции и кривой намагничивания электротехнической стали определяется величина напряжённости магнитного поля в спинке якоря и МДС этого участка:

$$AW_a = H_a L_a, \quad (96)$$

где средняя длина магнитной силовой линии

$$L_a = \pi \frac{(D_a - 2)(h_{\text{п}} - h_a)}{2p} + h_a. \quad (97)$$

Величина магнитной индукции в сердечнике полюса уточняется по выражению:

$$B_{\text{пл}} = \frac{\Phi_0 \sigma}{b_{\text{пл}} l_{\text{пл}} K_{3.с}}. \quad (98)$$

По кривой намагничивания материала полюсов и полученному значению магнитной индукции определяется напряжённость магнитного поля и рассчитывается величина МДС полюсов машины:

$$AW_{\text{пл}} = 2 H_{\text{пл}} h_{\text{пл}}. \quad (99)$$

Магнитная индукция в станине

$$B_{\text{ст}} = \frac{\Phi_0 \sigma}{2 h_{\text{ст}} K_{3.с}}. \quad (100)$$

Средняя длина магнитной силовой линии в станине

$$L_{\text{ст}} = \pi \frac{D_a + 2\delta + 2 h_{\text{пл}}}{2p}. \quad (101)$$

По рассчитанному значению магнитной индукции  $B_{\text{ст}}$  и кривой намагничивания материала станины определяется напряжённость магнитного поля  $H_{\text{ст}}$  и соответствующая МДС:

$$AW_{\text{ст}} = H_{\text{ст}} L_{\text{ст}}. \quad (102)$$

Если полюса выполнены отъёмными, то между станиной и сердечником полюса существует воздушный зазор  $\delta_{\text{ст}} = (0,035 \div 0,05)$  мм. В этом случае необходимо определить МДС этого зазора:

$$AW_{\delta_{\text{ст}}} = 2 \frac{B_{\text{пл}}}{\mu_0} \delta_{\text{ст}}. \quad (103)$$



Результирующая МДС машины на пару полюсов в режиме холостого хода

$$AW_B = AW_\delta + AW_z + AW_a + AW_{пл} + AW_{ст} + AW_{\delta ст}. \quad (104)$$

Характеристика холостого хода (х.х.х) МПТ – это зависимость ЭДС обмотки якоря от МДС возбуждения (или тока возбуждения) при неизменной частоте вращения и отсутствии тока якоря.

Таблица 3 Расчёт характеристики холостого хода МПТ

Величина	ЭДС якоря					
	0,5 E	0,8 E	1,0 E	1,1 E	1,2 E	1,3 E
Магнитный поток $\Phi_0$ , Вб						
Магнитная индукция в воздушном зазоре $B_\delta$ , Тл						
Магнитная индукция в зубцах якоря $B_z$ , Тл						
Магнитная индукция в спинке якоря $B_a$ , Тл						
Магнитная индукция в сердечнике полюса $B_{пл}$ , Тл						
Магнитная индукция в станине $B_{ст}$ , Тл						
Магнитная индукция в зазоре между полюсом и станиной $B_{\delta ст}$ , Тл						
МДС воздушного зазора $AW_\delta$ , А						
МДС зубцовой зоны $AW_z$ , А						
МДС спинки якоря $AW_a$ , А						
МДС сердечника полюса $AW_{пл}$ , А						
МДС станины $AW_{ст}$ , А						
МДС зазора между станиной и полюсом $AW_{\delta ст}$ , А						
Суммарная МДС на пару полюсов: $AW_B = \sum AW$ , А						

Расчёт х.х.х производится в следующей последовательности:

- задаются произвольными значениями ЭДС якорной обмотки  $E$ ;
- рассчитываются соответствующие значения магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{60 E a}{p N n} ; \quad (105)$$

- рассчитываются соответствующие значения магнитной индукции в воздушном зазоре;

- рассчитываются значения МДС для всех участков магнитной цепи и суммарная МДС возбуждения на пару полюсов. Производимые расчёты сводятся в таблицу 3, по данным которой строится зависимость  $E = f(AW_B)$ .

При работе МПТ под нагрузкой по обмотке якоря протекает ток и в круг проводников обмотки создаётся магнитное поле, называемое полем якоря. Рабочие характеристики МПТ определяются результирующим магнитным полем в зазоре машины, т.е. зависят и от поля якоря.

Воздействие магнитного поля якоря на основное поле машины, создаваемое обмоткой возбуждения, называют реакцией якоря.

Для учёта магнитного поля якоря его МДС представляют в виде суммы двух составляющих МДС поперечной и продольной реакции якоря.

Кроме того, на магнитное поле машины оказывают действие коммутационные токи, протекающие в секциях якоря при переключении их из одной параллельной ветви в другую. МДС коммутационных токов проявляется при замедленной или ускоренной коммутации и носит продольный характер.

Поперечная МДС при ненасыщенной машине искажает магнитное поле, не изменяя его величины. При насыщении машины МДС поперечной реакции якоря ослабляет магнитное поле.

Поскольку МПТ работают, как правило, с той или иной степенью насыщения, можно считать, что поперечная реакция якоря имеет размагничивающий характер независимо от режима работы МПТ (двигательный или генераторный).

При установке щёток строго на линии геометрической нейтрали продольная МДС якоря теоретически равна нулю. Однако в реальных машинах установить щётки на линии геометрической нейтрали не удаётся; они оказываются смещёнными по ходу вращения машины. Вследствие этого появляется незначительная продольная МДС, которая, как правило, носит намагничивающий характер в двигателях и размагничивающий в генераторах. Процесс коммутации в МПТ без добавочных полюсов оказывается замедленным, коммутационная МДС носит продольный характер, т.е. намагничивает машину в режиме двигателя и размагничивает в режиме генератора. Поскольку обмотка возбуждения должна скомпенсировать поле реакции якоря, то МДС реакции якоря рассчитывается следующим образом:



для двигателей:

$$AW_R = AW_{aq} - AW_{ad} - AW_k, \quad (106)$$

где  $AW_{aq}$  – МДС поперечной реакции якоря;

$AW_{ad}$  – МДС продольной реакции якоря;

$AW_k$  – коммутационная МДС.

Так как поперечный магнитный поток замыкается через зубцовую зону и воздушный зазор машины, для определения поперечной реакции якоря используется переходная кривая намагничивания (рисунок 5), которая строится по данным таблице 3.

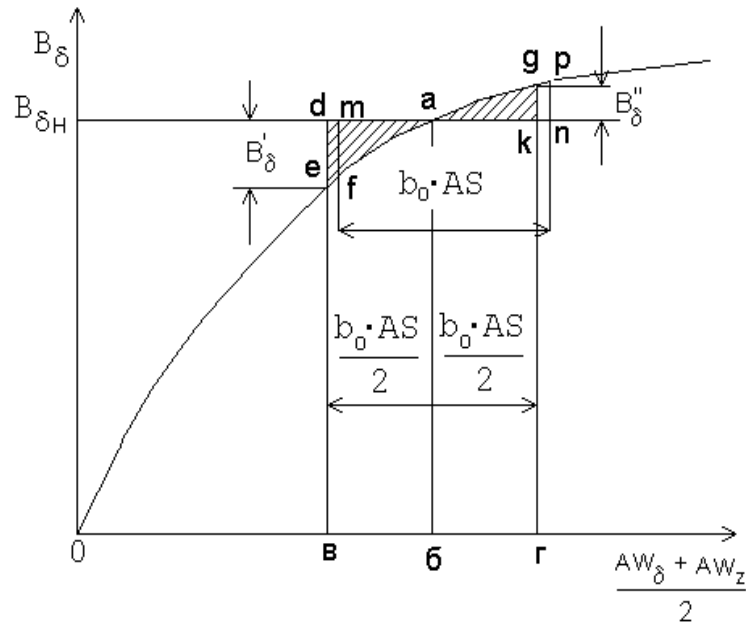


Рисунок 5. Переходная характеристика машины постоянного тока

На этой кривой по оси ординат откладывается номинальная величина магнитной индукции в воздушном зазоре (точка а) и определяется соответствующая номинальная МДС (точка б).

$$B_\delta = f(AW_\delta + AW_z) / 2, \quad (107)$$

Влево и вправо от этой точки в масштабе МДС откладываются отрезки бв и бг, изображающие МДС поперечной реакции якоря:

$$|бв| = |бг| = AS b_0 / 2. \quad (108)$$

Так как величины отрезков бв и бг пропорциональны величине расчётной полюсной дуги, а ординаты пропорциональны магнитной индукции, то площади криволинейных треугольников аде и агк представляют

соответственно уменьшение магнитного потока от реакции якоря под одним краем полюса и его возрастание – под другим. Разница площадей этих треугольников определяет уменьшение магнитного потока машины вследствие действия поперечной реакции якоря. Для компенсации этого размагничивающего действия необходимо увеличить МДС обмотки возбуждения на определённую величину, которая определяется следующим образом. Прямоугольник сдвигается вправо таким образом, чтобы площади полученных криволинейных треугольников  $amf$  и  $арп$  стали равными. Тогда величина МДС на пару полюсов, компенсирующая поперечную реакцию якоря, определяется выражением

$$AW_{aq} = 2 mn. \quad (109)$$

Эта величина может быть найдена и другим способом. Выражая площади криволинейных треугольников и приращений потоков по формуле Симпсона и приравнявая полученные выражения, можно определить величину МДС поперечной реакции якоря:

$$AW_{aq} \approx \frac{B'_\delta - B''_\delta}{6(B'_\delta + B''_\delta)} AS b_0. \quad (110)$$

МДС продольной реакции якоря зависит от сдвига щёток с линии геометрической нейтрали и определяется выражением

$$AW_{ad} = 2 b_\beta AS, \quad (111)$$

где  $b_\beta$  – сдвиг щёток с линии геометрической нейтрали вследствие неточности изготовления машины,  $b_\beta = 0,15 - 0,3$  мм.

Продольная коммутационная МДС, возникающая при замедленной коммутации, определяется величиной коммутирующего тока, индуктивностью коммутируемых секций, переходным сопротивлением щёток и угловой скоростью якоря. Величина коммутационной МДС при номинальном токе машины и номинальной частоте вращения может быть приближённо рассчитана по следующей формуле:

$$AW_K = \frac{b_k AS_H}{1 + K_K} \left( 1 + \frac{0,2\pi\tau}{\delta_a \lambda} 10^{-6} \right), \quad (112)$$

где  $b_k$  – ширина коллекторной пластины;

$AS_H$  – линейная токовая нагрузка при номинальном токе якоря;

$K_K$  – коэффициент, учитывающий падение напряжения в щётках

$$K_K = \frac{1,7\Delta U_{щ}}{4 W_c V_a \lambda AS_H I_0}. \quad (113)$$

Полная МДС возбуждения МПТ при нагрузке

$$AW_{\Sigma \text{НАГР}} = AW_\delta + AW_z + AW_a + AW_{пл} + AW_{ст} + AW_{\delta \text{СТ}} + AW_R. \quad (114)$$



Для двигателей и генераторов параллельного возбуждения вначале определяется ЭДС якоря для электродвигателей

$$E = U - \Delta U_a - \Delta U_{\text{щ}} \quad (115)$$

и для генераторов

$$E = U + \Delta U_a + \Delta U_{\text{щ}}. \quad (116)$$

По кривой холостого хода определяется результирующая МДС –  $AW'_{\Sigma \text{НАГР}}$  соответствующая найденному значению ЭДС, после чего рассчитывается полная МДС с учётом реакции якоря:

$$AW_{\Sigma \text{НАГР}} = AW'_{\Sigma \text{НАГР}} + AW_R. \quad (117)$$

Число витков обмотки возбуждения на один полюс

$$W_B = \frac{AW_{\Sigma \text{НАГР}}}{2I_a} \quad (118)$$

Предварительное сечение обмоточного провода для обмотки возбуждения

$$S_B = I_a / j_B, \quad (119)$$

где  $j_B$  – плотность тока в обмотке возбуждения, выбираемая в зависимости от номинального момента  $M_H$  по данным таблице 4.

$$M_H = 9,55 P_H / n_H. \quad (120)$$

Рассчитав сечение провода, выбирают номинальное сечение и диаметр провода в соответствии с ГОСТом, а затем уточняют реальную величину плотности тока возбуждения:

$$j_B = I_a / S_B. \quad (121)$$

Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии

$$R_B = K_B \frac{2\rho W_B l_{\text{CP}}}{\gamma_M S_B}, \quad (122)$$

где  $l_{\text{CP}}$  – средняя длина витка обмотки возбуждения, которая определяется по эскизу расположения обмотки на сердечнике полюса. При неотъёмных полюсах машины среднюю длину витка необходимо увеличить на величину  $(b_0 - b_{\text{пл}})$ , с тем чтобы была возможность надеть катушку обмотки возбуждения на сердечник полюса через полюсный наконечник.

Падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U_B = I_a R_B. \quad (123)$$

Величина ЭДС якоря двигателя последовательного возбуждения при нагрузке

$$E = U_H - \Delta U_a - \Delta U_{\text{щ}} - \Delta U_B. \quad (124)$$

Полученная величина ЭДС не должна отличаться от предварительно выбранного значения более чем на 3%. При большей разнице необходимо



скорректировать число витков обмотки возбуждения. Для этого определяют МДС обмотки возбуждения по характеристике холостого хода и найденному значению ЭДС, прибавляют МДС реакции якоря при номинальной нагрузке, уточняют число витков обмотки возбуждения, её сопротивление, падение напряжения и новое значение ЭДС машины  $E_a$ .

Площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$S_{\text{в.окна}} = \frac{W_{\text{в}} d_{\text{в.из}}^2}{f_0}, \quad (125)$$

где  $f_0$  – технологический коэффициент, учитывающий промежутки между проводниками и изоляцию провода,  $f_0 = 0,8 - 0,84$ .

Фактическая площадь окна для обмотки возбуждения должна быть увеличена на 10 – 20 % для учёта возможных неточностей намотки.

Исходя из полученного значения площади окна уточняют высоту сердечника полюса и определяют ширину стороны катушки возбуждения с таким расчётом, чтобы обмотка возбуждения свободно размещалась в окне между станиной и полюсным наконечником.

Расчёт обмотки возбуждения МПТ с независимым возбуждением производится в такой последовательности:

Задаются величиной тока возбуждения

$$I_{\text{в}} \approx (5 \div 10)\% I_a.$$

Большие значения тока принимаются для машин меньшей мощности.

Исходя из режима работы МПТ и её исполнения, по данным таблице 4 выбирается величина допустимой плотности тока в обмотке возбуждения  $j_{\text{в}}$ . После этого рассчитывают сечение провода обмотки возбуждения по выражению

$$S'_{\text{в}} = I_{\text{в}} / j_{\text{в}}. \quad (126)$$

По найденному значению  $S'_{\text{в}}$  выбирается марка, сечение и диаметр провода обмотки возбуждения, соответствующего ГОСТу.

Зная МДС возбуждения для номинального режима работы  $AW_{\Sigma\text{нагр}}$ , рассчитывают число витков обмотки возбуждения на один полюс:

$$W_{\text{в}} = \frac{AW_{\Sigma\text{нагр}}}{2I_{\text{в}}} \quad (127)$$

По выражению (122) рассчитывается сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии, а исходя из номинального напряжения сети – уточнённые значения тока возбуждения и его плотности, которая должна быть близкой к принятому ранее значению.

Площадь окна, необходимую для размещения обмотки возбуждения, рассчитывают так же, как и для машин с последовательным возбуждением.



Таблица 4 Плотность тока в обмотке возбуждения МПТ малой мощности ( $\times 10^6$  А/м<sup>2</sup>)

Номинальный момент M <sub>н</sub> , Нм	Режим работ		Номинальный момент M <sub>н</sub> , Нм	Режим работ	
	продолжительный	кратковременный		продолжительный	кратковременный
Закрытое исполнение					
0,01	8,0	16,0	0,2	4,6	11,0
0,02	7,5	15,0	0,4	4,3	10,0
0,03	7,0	14,2	0,6	4,0	9,5
0,04	6,5	13,5	0,8	3,8	9,2
0,05	6,2	12,7	1,0	3,5	9,0
0,06	5,8	12,2	1,2	3,4	8,8
0,07	5,5	11,7	1,4	3,2	8,5
0,08	5,2	11,3	1,6	3,0	8,2
0,09	5,0	11,2	1,8	2,8	8,0
0,1	4,8	11,0	2,0	2,7	7,8
Защищённое исполнение с вентилятором					
0,01	11,5	21,5	0,2	9,4	16,8
0,02	10,8	20,8	0,4	9,0	16,5
0,03	10,5	20,0	0,6	8,4	15,8
0,04	10,2	19,5	0,8	8,0	15,2
0,05	9,8	19,0	1,0	7,6	14,8
0,06	9,7	18,6	1,2	7,2	14,2
0,07	9,6	18,1	1,4	7,0	13,9
0,08	9,5	17,7	1,6	6,8	13,6
0,09	9,5	17,2	1,8	6,6	13,2
0,1	9,5	17,0	2,0	6,5	13,0

В МПТ различают следующие виды потерь:

- потери в обмотках якоря и возбуждения;
- потери в щётках;
- потери в стали якоря;
- механические потери;
- добавочные потери.

Потери в обмотках якоря и возбуждения рассчитываются следующим образом:

для МПТ с последовательным возбуждением

$$\Delta P_{\text{ма}} = I_a^2 R_a; \quad (128)$$

$$\Delta P_{\text{мв}} = I_a^2 R_{\text{в}}; \quad (129)$$



для машин с параллельным возбуждением

$$\Delta P_{\text{мв}} = U_{\text{H}} I_{\text{в}}. \quad (130)$$

Потери в щётках

$$\Delta P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{а}}. \quad (131)$$

Потери в стали якоря включают в себя потери в сердечнике якоря и потери в зубцах якоря.

Масса стали якоря

$$G_{\text{с.а}} = 7800 [\pi (D_{\text{а}} - 2 h_{\text{п}})^2 l_{\text{о}}] / 4. \quad (132)$$

Масса зубцов якоря

$$G_{\text{с.з}} = 7800 Z b_{\text{з.ср}} h_{\text{п}} l_{\text{о}}. \quad (133)$$

Потери в стали сердечника якоря

$$\Delta P_{\text{с.а}} = p_{\text{уд}} B_{\text{а}}^2 f^{1,3} G_{\text{с.а}}. \quad (134)$$

Потери в зубцах якоря

$$\Delta P_{\text{с.з}} = p_{\text{уд}} B_{\text{з}}^2 f^{1,3} G_{\text{с.з}}. \quad (135)$$

В этих выражениях удельные потери для данного сорта стали принимаются увеличенными в 1,5 – 1,8 раза.

Потери в стали статора

$$\Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{с.а}} + \Delta P_{\text{с.з}}. \quad (136)$$

Полные механические потери включают в себя потери на трение щёток о коллектор, потери на трение в шарикоподшипниках и потери на трение о воздух.

Потери на трение щёток о коллектор

$$\Delta P_{\text{тр.щ}} = 9,81 K_{\text{тр}} P_{\text{щ}} S_{\text{щ}} V_{\text{к}}, \quad (137)$$

где  $K_{\text{тр}}$  – коэффициент трения щёток о коллектор,  $K_{\text{тр}} = 0,2 - 0,25$ .

$P_{\text{щ}}$  – удельное нажатие щёток,  $P_{\text{щ}} = 1,96 - 2,35 \text{ Н/м}^2$  для угольных и угольно-графитовых щёток;  $P_{\text{щ}} = 2,0 - 4,0 \text{ Н/м}^2$  для электрографитных щёток;  $P_{\text{щ}} = 1,5 - 2,0 \text{ Н/м}^2$  для медно-графитных щёток;  $P_{\text{щ}} = 1,7 - 2,2 \text{ Н/м}^2$  для бронзо-графитных щёток.

$S_{\text{щ}}$  – поверхность всех щёток;

$V_{\text{к}}$  – окружная скорость коллектора.

Потери на трение в шарикоподшипниках

$$\Delta P_{\text{тр.под}} = K_{\text{ш}} G_{\text{а}} n \cdot 10^{-3}. \quad (138)$$

Для машин малой мощности с шарикоподшипниками  $K_{\text{ш}} = 1 - 3$ . Большие значения относятся к машинам меньшей мощности.



Масса якоря  $G_a$  может быть рассчитана по приближённой формуле

$$G_a = 1000 \pi (D_a^2 l_o \gamma_a + D_k^2 l_k \gamma_k) / 4. \quad (139)$$

В этом выражении средняя объёмная масса якоря  $\gamma_a = 7800 \text{ кг/м}^3$ , объёмная масса коллектора  $\gamma_k = 8900 \text{ кг/м}^3$ .

Потери на трение о воздух могут быть рассчитаны для машин малой мощности с частотой вращения до 12000 об/мин по формуле

$$\Delta P_{\text{тр.в}} = 2 D_a^3 n^3 l_o 10^{-6}; \quad (140)$$

при  $n > 12000$  об/мин

$$\Delta P_{\text{тр.в}} = 0,3 D_a^5 (1 + l_o / D_a) n^3 \cdot 10^{-6}. \quad (141)$$

Полные механические потери

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{тр.щ}} + \Delta P_{\text{тр.под}} + \Delta P_{\text{тр.в}}. \quad (142)$$

Полные потери в машине

$$\Delta P_{\Sigma} = \zeta_o (\Delta P_{\text{ма}} + \Delta P_{\text{мв}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}}), \quad (143)$$

где коэффициент  $\zeta_o = 1,1 - 1,2$  учитывает добавочные потери.

При номинальной нагрузке КПД для двигателя

$$\eta_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}} - \Delta P_{\Sigma}}{U_{\text{н}} I_{\text{н}}} 100\% \quad (144)$$

КПД для генератора

$$\eta_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{U_{\text{н}} I_{\text{н}} + \Delta P_{\Sigma}} 100\% \quad (145)$$

В выражениях (144), (145)  $I_{\text{н}} = I_a$  – для электродвигателей последовательного возбуждения;  $I_{\text{н}} = I_a + I_B$  – для электродвигателей параллельного возбуждения;  $I_{\text{н}} = I_a - I_B$  – для генераторов параллельного возбуждения.

Если номинальная мощность электродвигателя

$$P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}} - \Delta P_{\Sigma} \quad (146)$$

отличается от заданной, то необходимо пересчитать величину номинального тока якоря:

$$I_a = 0,5 A - (0,25 A^2 - B). \quad (147)$$

Для электродвигателей последовательного возбуждения

$$A = \frac{U/\varepsilon_0 - \Delta U_{\text{щ}}}{R_a + R_B}; \quad B = \frac{P/\varepsilon_0 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}}}{R_a + R_B}; \quad (148)$$

для электродвигателей параллельного возбуждения

$$A = \frac{U/\varepsilon_0 - \Delta U_{\text{щ}}}{R_a}; \quad B = \frac{P/\varepsilon_0 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + U I_B (1 - 1/\varepsilon_0)}{R_a}; \quad (150)$$



После определения нового значения тока необходимо пересчитать величины потерь  $\Delta P_{ма}$ ,  $\Delta P_{мв}$ ,  $\Delta P_{щ}$ ,  $\Delta P_{\Sigma}$ , а также рассчитать новое значение КПД двигателя.

Рабочие характеристики двигателя постоянного тока. Рабочими характеристиками называются зависимости  $I = f(M)$ ;  $P_1 = f(M)$ ;  $P_2 = f(M)$ ;  $n = f(M)$ ;  $\eta = f(M)$ .

Расчёт рабочих характеристик рационально вести в виде таблицы, заполняемой по мере вычисления отдельных величин.

Величина электромагнитного момента рассчитывается по выражению

$$M = \frac{pN}{2a\pi} \Phi I \quad (151)$$

Таблица 5 Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока

Рассчитываемая величина	Потребляемый из сети или отдаваемый в сеть ток			
	0,5 $I_H$	0,8 $I_H$	1,0 $I_H$	1,2 $I_H$
Ток возбуждения $I_B$ , А				
Ток якоря $I_a$ , А				
Падение напряжения $\Delta U_a$ , В				
Падение напряжения $\Delta U_b$ , В				
Падение напряжения $\Delta U_{щ}$ , В				
Падение напряжения $\Delta U$ , В				
ЭДС якоря $E_a$ , В				
МДС возбуждения, А				
МДС реакции якоря, А				
МДС машины под нагрузкой, А				
Магнитный поток, Вб				
Частота вращения, об/мин				
Потери в якоре, Вт				
Потери возбуждения, Вт				
Потери в щётках, Вт				
Потери в стали, Вт				
Механические потери, Вт				
Суммарные потери, Вт				
Потребляемая мощность $P_1$ , Вт				
Полезная мощность $P_2$ , Вт				
КПД двигателя				
Момент двигателя, Нм				



Заполнение таблицы следует начинать с номинального значения тока  $I_H$ . Суммарную величину реакции якоря принимают пропорциональной току якоря, а величину магнитного потока определяют по кривой намагничивания для каждого значения тока якоря и результирующей МДС с учётом реакции якоря.

По данным таблице 5 строятся рабочие характеристики электродвигателя в общих координатных осях (рисунок 6).

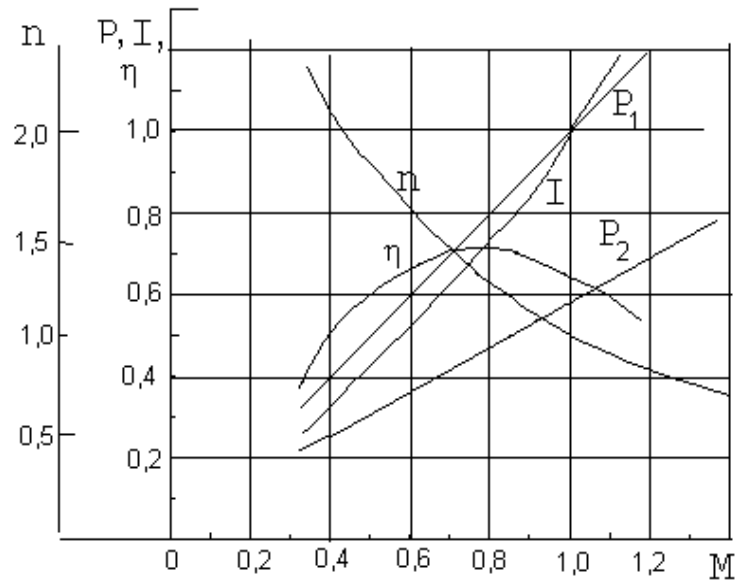


Рисунок 6 - Рабочие характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Потери, выделяемые в элементах электрических машин, превращаются в тепло, которое вызывает их нагрев и рассеивается в окружающее пространство. По мере увеличения температуры деталей машины увеличивается их теплоотдача, в результате чего температура не возрастает до бесконечности, а принимает установившееся значение. В этом случае выделившееся в машине тепло полностью отдаётся в окружающую среду. Величина установившейся температуры определяется мощностью потерь, габаритами машины и должна соответствовать температурной устойчивости изоляции. Поскольку точный учёт всех факторов нагрева и условий теплоотдачи в машинах малой мощности затруднителен, то расчёт превышений температуры элементов машины над окружающей средой производится приближёнными методами.

Превышение температуры якоря. При расчётах считается, что всё тепло, выделяющееся в обмотке якоря, передаётся через пазовую изоляцию стали якоря. Поэтому суммарные потери якоря, определяемые потерями в

обмотке, стали якоря и потерями от трения о воздух, снимаются охлаждающим воздухом с его поверхности.

Среднее превышение температуры обмотки якоря при установившемся режиме определяется выражением

$$\Theta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a b_{z1} \frac{\beta}{\lambda' \Pi}\right) w_{м.а} + w_{с.а} + w_{тр.в}}{\alpha_a b_{z1}}, \quad (152)$$

где  $\alpha_a$  – результирующий коэффициент теплоотдачи наружной поверхности якоря, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha_a = \alpha' (1 + 01 V_a), \quad (153)$$

$\alpha'$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности неподвижного якоря, для машин закрытого исполнения  $\alpha' = 14 - 18$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); для машин защищённого исполнения с вентиляцией  $\alpha' = 36 - 44$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$b_{z1}$  – ширина вершины зубца якоря;

$\beta$  – общая толщина изоляции от меди до стенки паза,

$$\beta = \beta_1 + \beta_2, \quad (154)$$

где  $\beta_1$  – толщина пазовой изоляции плюс односторонняя толщина изоляции проводника;

$\beta_2$  – эквивалентная межвитковая изоляция проводников в пазу,

$$\beta_2 = \frac{m_a d_{а.из}}{4 K_c}; \quad (155)$$

где  $m_a$  – число проводников в ряду по средней ширине паза;

$d_{а.из}$  – диаметр изолированного проводника;

$K_c$  – коэффициент, определяемый выражением

$$K_c = 1 + 4 (d_a / d_{а.из} - 0,4); \quad (156)$$

$\lambda'$  – коэффициент теплопроводности межвитковой и пазовой изоляции,

$$\lambda' = (0,12 - 0,13) \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$\Pi$  – периметр паза;

$w_{м.а}$  – удельные потери в меди обмотки якоря на единицу длины,

$$w_{м.а} = \frac{\Delta P_{м.а}}{Z l_a}; \quad (157)$$

$w_{с.а}$  – удельные потери в стали якоря на единицу его длины,

$$w_{с.а} = \frac{\Delta P_c}{Z l_o}; \quad (158)$$

$w_{тр.в}$  – удельные потери трения якоря о воздух на единицу длины якоря,



$$w_{\text{тр.в}} = \frac{\Delta P_{\text{тр.в}}}{Z l_0}. \quad (159)$$

Превышение температуры коллектора. Полные потери в коллекторе

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{тр.щ}}. \quad (160)$$

Поверхность охлаждения коллектора

$$S_{\text{к.ох}} = \pi D_{\text{к}} l_{\text{к}}. \quad (161)$$

Среднее превышение температуры коллектора над температурой окружающей среды

$$\Theta_{\text{к}} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}} (1 + 0,1 V_{\text{к}}) S_{\text{к.ох}}}, \quad (162)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи коллектора,  $\alpha_{\text{к}} = 40 - 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Превышение температуры обмотки возбуждения. Потери в одной катушке обмотки возбуждения

$$w_{\text{м.в}} = \Delta P_{\text{м.в}} / 2p. \quad (163)$$

Поверхность охлаждения одной катушки обмотки возбуждения для машины с отъёмными полюсами

$$S_{\text{в.ох}} = 2 (b_{\text{пл}} + l_{\text{пл}} + 4 \delta_{\text{к}}) h_{\text{к}} + 2 (b_{\text{пл}} + 2 \delta_{\text{к}}) \delta_{\text{к}}, \quad (164)$$

для машины с шихтованной станиной

$$S_{\text{в.ох}} = (b_0 + b_{\text{пл}} + 2l_{\text{пл}} + 8 \delta_{\text{к}}) h_{\text{к}} + (b_0 + b_{\text{пл}} + 4 \delta_{\text{к}}) \delta_{\text{к}}. \quad (165)$$

В этих выражениях:  $b_{\text{пл}}$  и  $l_{\text{пл}}$  – ширина и длина сердечника полюса;

$\delta_{\text{к}}$  и  $h_{\text{к}}$  – ширина и высота катушки обмотки возбуждения.

Среднее превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды

$$\Theta_{\text{в}} = \frac{w_{\text{м.в}}}{\alpha'_{\text{о}} S_{\text{в.ох}}}, \quad (166)$$

где  $\alpha'_{\text{о}}$  – коэффициент теплоотдачи катушек обмотки возбуждения, для машин закрытого исполнения  $\alpha'_{\text{о}} = 26 - 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; для машин защищённого исполнения с вентиляцией  $\alpha'_{\text{о}} = 52 - 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Рассчитанные значения превышений температуры элементов электрических машин над температурой окружающей среды ( $\Theta_{\text{окр}} = 40^{\circ} \text{С}$ ) не должны превышать допустимых для выбранного класса изоляции [8].



### Список литературы

- 1 Использование стандартов в курсовом и дипломном проектировании: метод. указания. Ч. 1–3 / Сост. Г. С. Ленеvский, А. Н. Шапчиц. – Могилев: МГТУ, 2002. – 110 с.
- 2 **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин. / Под ред. И.П. Копылова. 2-е изд., перераб. и доп., книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1993. 464 с.
- 3 **Гольдберг О.Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.** Проектирование электрических машин. / Под ред. О.Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 430 с.
- 4 **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин. / Под ред. И.П. Копылова. 2-е изд., перераб. и доп., книга 2. М.: Энергоатомиздат, 1993. 384 с.
- 5 **Копылов И.П.** Электрические машины. М.: Высшая школа, 2000. 607 с.
- 6 **Кожевников В.А., Копылов И.П.** Развитие теории и конструкции машин постоянного тока. Л.: Наука, 1985. 147 с.
- 7 **Ермолин Н.П.** Электрические машины малой мощности. М.: Высшая школа, 1967.
- 8 Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности. Пособие по курсовому проектированию. / Сост. Е.Ф. Беляев Пермь: Пермский государственный технический университет, 2001 – 71 с.

