

Министерство образования Российской Федерации  
Пермский государственный технический университет

**Е.Ф.Беляев**

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебно-методического  
пособия по курсовому проектированию

Пермь 2001

УДК 621.313  
Б44

Рецензент  
канд. техн. наук, доц. *А.И. Судаков*

**Беляев Е.Ф.**

Б44 Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 72 с.

Изложены методы расчета геометрии конструктивных элементов, параметров и рабочих характеристик машин постоянного тока, выполняемые вручную и на ЭВМ. Приведена методика расчета оптимальных размеров магнита постоянного тока для возбуждения машин, а также упрощенный тепловой расчет. Теоретические вопросы проиллюстрированы примерами расчета.

Предназначено для студентов заочных отделений вузов специальности "Электромеханика", занимающихся изучением вопросов проектирования электрических машин.

УДК 621.313

© Пермский государственный  
технический университет, 2000

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование электрических машин (ЭМ) включает расчёт и конструирование. Расчёт машины представляет математически неопределённую задачу, т.к. число неизвестных, подлежащих определению, превышает число уравнений. Поэтому в процессе расчёта приходится задаваться некоторыми величинами, используя опыт проектирования подобных машин и экспериментальные данные. В процессе расчёта, как правило, рассматривают несколько вариантов, окончательно принимая наиболее выгодный.

Проектирование электрических машин 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.

Результаты расчёта ЭМ достаточно хорошо согласуются с опытом лишь при проектировании машин средней и большой мощностей. В этом случае расхождение расчётных и экспериментальных данных в среднем не превышает 10%. Для машин малой мощности эти погрешности значительно больше и расхождение между расчётными и опытными данными может достигать 40%.

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.

Расчётный формуляр проектируемой машины должен содержать: исходные данные для проектирования, данные расчётов и графическую часть. Последняя включает в себя общий вид и разрез машины, эскиз листа статора и якоря, эскиз паза в разрезе с обмоткой и изоляцией, развёрнутую схему обмот-

ки якоря, рабочие характеристики ЭМ. Расчёт габаритов, параметров и величин, характеризующих МПТ, производится с использованием системы СИ.

## 1. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ МАШИНЫ

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.

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

Для двигателя постоянного тока

$$P_a = EI_a = U - I_a^2 R_a - \Delta U_{щ} I_a = \frac{P_H}{\eta_H} (\Delta P_M + \Delta P_{щ}), \quad (1.1)$$

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

$U$  – напряжение, подводимое к двигателю;

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

$P_H$  – номинальная мощность двигателя;

$\eta_H$  – 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:

$$\Delta P_M + \Delta P_{щ} \approx \frac{2}{3} \Delta P_{\Sigma} = \frac{2}{3} \frac{P_H}{\eta_H} (1 - \eta_H), \quad (1.2)$$

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

В этом случае расчётная мощность двигателя определяется следующим выражением:

$$P_a = \frac{1 + 2\eta_H}{3\eta_H} P_H. \quad (1.3)$$

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

$$P_a = \frac{1 + 3\eta_H}{4\eta_H} P_H. \quad (1.4)$$

В генераторах постоянного тока продолжительного режима потери в обмотке якоря и щётках составляют в среднем около половины общих потерь. Расчётная мощность для этих машин может быть рассчитана по формуле

$$P_a = EI_a = UI_a + UI_B + I_a^2 R_a + \Delta U_{щ} I_a, \quad (1.5)$$

где  $I_B$  – ток возбуждения генератора.

Это выражение обычно преобразовывают к виду

$$P_a = \frac{1 + \eta_H}{2\eta_H} P_H. \quad (1.6)$$

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

Таблица 1

Значения КПД машин постоянного тока, %

P <sub>н</sub> , Вт	Режим		P <sub>н</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.

2. Величина тока якоря рассчитывается по следующим выражениям:

а) для двигателя последовательного возбуждения

$$I_a = \frac{P_H}{U\eta_H}; \quad (1.7)$$

б) для двигателя параллельного возбуждения

$$I_a = \frac{P_H}{U\eta_H} - I_B; \quad (1.8)$$

в) для генератора параллельного возбуждения

$$I_a = \frac{P_H}{U} - I_B. \quad (1.9)$$

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:

$$E = \frac{P_a}{I_a}. \quad (1.10)$$

3. Машинную постоянную рассчитывают по уравнению

$$C = \frac{6,0}{\alpha B_{\delta} AS}, \quad (1.11)$$

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 табл. 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.

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 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 перемagnичивание 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:

$$\xi = l_0 / D_a = 0,4 - 1,6 .$$

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.

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:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{CP_a}{\xi n_H}} . \quad (1.12)$$

Тогда длина якоря

$$l_0 = \xi D_a . \quad (1.13)$$

Полученные значения округляют до ближайшего стандартного типоразмера (прилож., табл. 1).

4. Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \pi D_a n_H / 60 . \quad (1.14)$$

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

5. Полусное деление

$$\tau = \pi D_a / 2p . \quad (1.15)$$

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 уве-

личения 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

$$b_o = \alpha \tau \quad (1.16)$$

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.

6. Частота перемагничивания стали якоря

$$f = \frac{p n_H}{60}. \quad (1.17)$$

7. 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:

$$AS b_o \leq (F_{\delta H} + F_{ZH}), \quad (1.18)$$

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

Принимая ориентировочно

$$F_{ZH} = (0,15 \div 0,25) F_{\delta H} \quad (1.19)$$

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

для электродвигателей с продолжительным режимом работы

$$\delta = 0,25 \frac{\tau AS}{B_{\delta}} 10^{-6}; \quad (1.20)$$

для электродвигателей с кратковременным режимом работы

$$\delta = 0,15 \frac{\tau AS}{B_{\delta}} 10^{-6}; \quad (1.21)$$

для генераторов

$$\delta = 0,4 \frac{\tau AS}{B_{\delta}} 10^{-6}. \quad (1.22)$$

## 2. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

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.

8. Полезный поток одного полюса машины



$$\Phi = B_{\delta} b_o l_o. \quad (2.1)$$

9. Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{60 a E}{\rho n_H \Phi}, \quad (2.2)$$

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

10. 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

$$Z = (3 \div 4) D_a, \quad (2.3)$$

где диаметр якоря измерен в сантиметрах.

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

$$K = Z_{\varepsilon} = u_{\Pi} Z, \quad (2.4)$$

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

$$U_{kcp} = \frac{2pU}{K} \leq 25 - 30 \text{ В.}$$

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

12. Число витков в секции обмотки якоря

$$W_c = \frac{N}{2K}. \quad (2.5)$$

Число витков в секции должно быть целым. Поэтому рассчитанное по (2.5) значение округляется, а число проводников обмотки якоря соответствующим образом корректируется. Окончательные значения  $u_{\Pi}$  и  $W_c$  принимаются после проверки коммутации, т.к. величина реактивной ЭДС, определяющей характер процесса коммутации, пропорциональна числу  $W_c$ .

13. Для простой петлевой обмотки шага обмотки якоря

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon; \quad y_2 = y_1 - 1; \quad y = 1; \quad y_k = 1; \quad (2.6)$$

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.

14. Линейная нагрузка якоря принимается с учётом скорректированного числа проводников обмотки якоря

$$AS = \frac{N I_a}{2\pi D_a}. \quad (2.7)$$

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 (2.7) и производится повторный расчёт.

### 3. РАЗМЕРЫ ЗУБЦОВ, ПАЗОВ И ПРОВОДНИКОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В МПТ малой мощности часто используются пазы круглой, овальной и трапецидальной 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 трапецидальная 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.

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

$$q = \Theta_m \alpha (1 + 0,1 V), \quad (3.1)$$

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  $V$ :

$$V = (V_a^2 + V_B^2)^{1/2}, \quad (3.2)$$

где  $V_B$  – окружная скорость лопаток вентилятора,

$$V_B = \pi D_B n_H / 60; \quad (3.3)$$

$D_B$  – диаметр колеса центробежного вентилятора,

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

Удельная тепловая нагрузка для кратковременного режима работы

$$q = \frac{\Theta_M \alpha (1+0,1V)}{f(t_p/T_p)}, \quad (3.4)$$

здесь  $t_p$  – время работы двигателя, с;

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

$$T_p \approx \frac{936 D_a}{\alpha (1+0,1V)} 10^3. \quad (3.5)$$

$$f(t_p/T_p) = 1 - \exp(-t_p/T_p). \quad (3.6)$$

Для МПТ, работающих в повторно-кратковременном режиме,

$$q = \frac{\Theta_M \alpha (1+0,1V)}{f(t_p/T_p) \Psi(t_p/T_p)}, \quad (3.7)$$

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

$$\begin{aligned} \Psi(t_p/T_p) = & 1 + \exp(-a_1 t_p/T_p) + \exp(-2 a_1 t_p/T_p) + \dots \\ & + \dots \exp[-(n-1) a_1 t_p/T_p], \end{aligned} \quad (3.8)$$

где  $n$  – число циклов работы;

$$a_1 = \left( 1 + \frac{T_p t_{\Pi}}{T_{\Pi} t_p} \right); \quad (3.9)$$

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

$t_{\Pi}$  – время паузы, с.

16. 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

$$J_a = \frac{17q}{AS} 10^6; \quad (3.10)$$

при  $5000 \leq n \leq 10000$  об/мин

$$J_a = \frac{14q}{AS} 10^6; \quad (3.11)$$

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

$$J_a = \frac{12q}{AS} 10^6; \quad (3.12)$$

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

$$J_a = \frac{13q}{AS} 10^6; \quad (3.13)$$

при  $5000 \leq n \leq 10000$  об/мин

$$J_a = \frac{11q}{AS} 10^6; \quad (3.14)$$

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

$$J_a = \frac{10q}{AS} 10^6. \quad (3.15)$$

17. Предварительное сечение проводников обмотки якоря

$$S_a = \frac{I_a}{2J_a}. \quad (3.16)$$

По полученному сечению рассчитывается диаметр провода (выбирается ближайшее его значение), марка и необходимый класс изоляции (прилож., табл. 2). Для выбранного провода определяется сечение и реальная плотность тока в якорной обмотке.

18. Предварительная величина площади паза якоря

$$S_{\text{п}} = \frac{S_{\text{а.из}} N_{\text{п}}}{K_{\text{з.п}}}, \quad (3.17)$$

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

$$N_{\text{п}} = N / Z; \quad (3.18)$$

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

$$S_{\text{а.из}} = \pi d_{\text{из}}^2 / 4, \quad (3.19)$$

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

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

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

$$d_{\text{п}} = (4 S_{\text{п}} / \pi)^{0,5}. \quad (3.20)$$

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 листа якоря (рис.1).

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

Зубцовое деление якоря

$$t_z = \pi D_a / Z. \quad (3.21)$$

Максимальная ширина зубца

$$b_{z1} = t_z - b_{\text{щ}}. \quad (3.22)$$

Ширина зубца в основании паза

$$b_{z2} = t_2 = \frac{\pi [D_a - 2(d_n + h_{\text{щ}})]}{Z}. \quad (3.23)$$

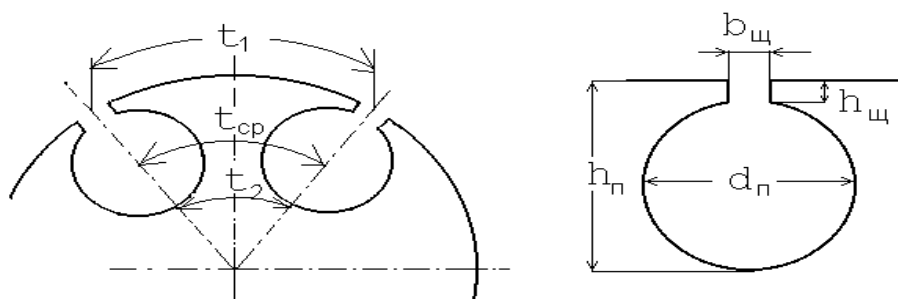


Рис.1. Паза якоря круглой формы

Ширина паза в среднем сечении

$$b_{z_{\text{cp}}} = t_{\text{cp}} - d_n = \frac{\pi [D_a - (d_n + h_{\text{щ}})]}{Z} - d_n. \quad (3.24)$$

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

$$B_{z_{\text{м}}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z_{\text{cp}}} K_{z.c}}, \quad (3.25)$$

где  $K_{z.c}$  – коэффициент заполнения стали. Его величина зависит от толщины листа и вида изоляции. Для современных сталей величина  $K_{z.c}=0,95-0,97$  (прилож., табл. 4).

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 трапецидальной формы (рис.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.

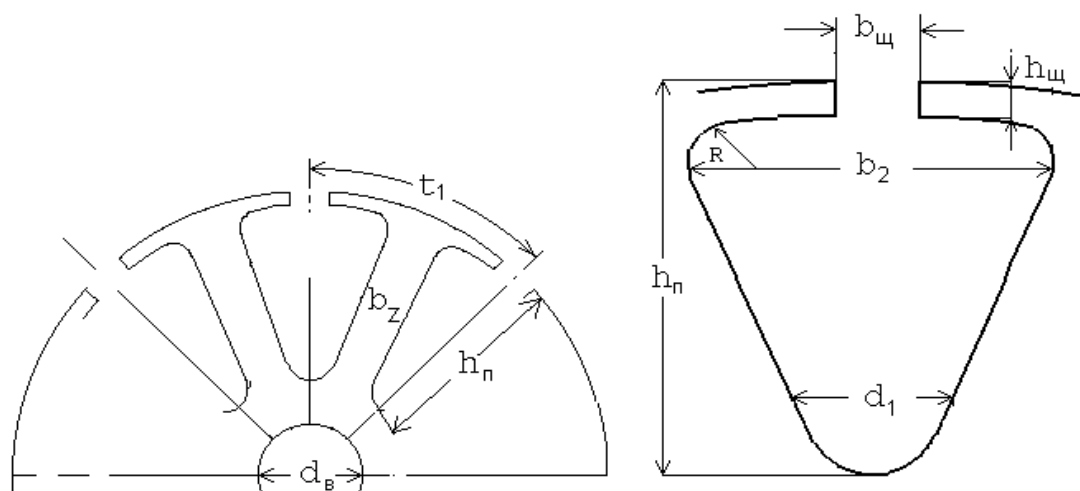


Рис.2. Пазы якоря трапецидальной формы

Ширина зубца может быть рассчитана исходя из допустимых значений магнитной индукции  $B_z$  по выражению (3.25).

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

$$h_n = (D_a - d_B - 2 h_a), \quad (3.26)$$

$$h_n = (0,22 \div 0,3) D_a.$$

Диаметр вала МПТ

$$d_B = (0,18 \div 0,24) D_a.$$

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

$$h_a = \frac{\alpha \tau B_\delta}{2 K_{3.c} B_a}, \quad (3.27)$$

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  $h_n$ .

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

$$b_{\text{п макс}} = \frac{3,14(D_a - 2h_{\text{щ}}) - b_z Z}{Z + 3,14}, \quad (3.28)$$

$$b_{\text{п мин}} = \frac{3,14(D_a - 2h_{\text{п}}) - b_z Z}{Z - 3,14}, \quad (3.29)$$

а высота средней части паза

$$h_{12} = h_{\text{п}} - h_{\text{щ}} - b_{\text{п макс}} / 2 - b_{\text{п мин}} / 2. \quad (3.30)$$

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

$$S_{\text{п}} = h_{12} \left( \frac{b_{\text{п макс}} + b_{\text{п мин}}}{2} \right) + \frac{3,14}{8} (b_{\text{п макс}}^2 + b_{\text{п мин}}^2). \quad (3.31)$$

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.

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

$$l_a = l_0 + 1,2 D_a; \quad (3.32)$$

при  $2p = 4$

$$l_a = l_0 + 0,8 D_a. \quad (3.33)$$

21. В нагретом состоянии сопротивление обмотки якоря

$$R_a = K_{\Theta} \frac{N I_a}{4 \gamma_M S_a}. \quad (3.34)$$

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

$$K_{\Theta} = 1 + 0,004 (\Theta - \Theta_{\text{окр}}), \quad (3.35)$$

где  $\Theta$  – рабочая температура;

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

22. Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_a = I_a R_a. \quad (3.36)$$

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

#### 4. КОЛЛЕКТОР И ЩЁТОЧНЫЙ АППАРАТ

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

$$\Delta_k = (0,1 \div 0,2) D_k .$$

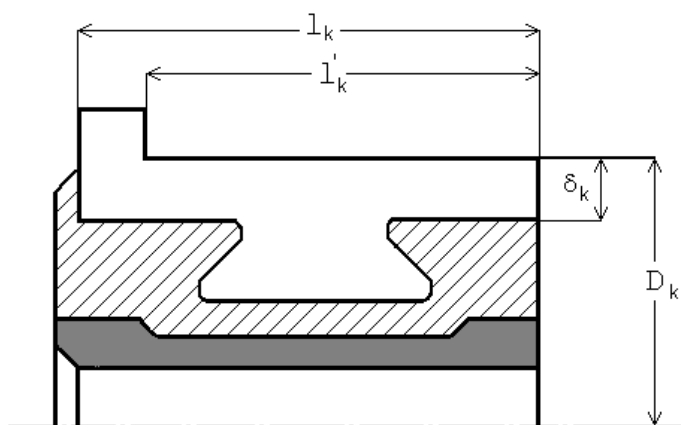


Рис.3. Коллектор машины постоянного тока

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.

23. Предварительный диаметр коллектора

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

24. 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.

Коллекторное деление

$$t_k = \frac{\pi D_k}{K} . \quad (4.1)$$



Для правильно спроектированного коллектора должно выполняться соотношение

$$t_k = b_k + b_{из}. \quad (4.2)$$

Ширина коллекторной пластины при этом должна соответствовать ГОСТ 4134–75. Определив  $t_k$ , уточняют диаметр коллектора, используя выражение (4.1).

Окружная скорость коллектора

$$V_k = \pi D_k n / 60. \quad (4.3)$$

25. В МПТ малой мощности для улучшения коммутации наиболее часто используются твёрдые медно-графитовые или электрографитированные 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:

$$S_{щ} = \frac{I_a}{\rho J_{щ}}. \quad (4.4)$$

С другой стороны,

$$S_{щ} = a_{щ} b_{щ}, \quad (4.5)$$

где  $a_{щ}$  – осевая ширина щётки;

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

$$b_{щ} = (2 \div 3) b_k.$$

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 (4.4). Величина плотности не должна превосходить допустимого значения для выбранного типа щёток.

26. Активная длина коллектора по оси вала

$$l_k = (1,5 \div 2,0) a_{щ}.$$

Полная длина коллектора

$$l_k = l_k + (3 \div 5) d_a,$$

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

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

ющим краем щёток и, следовательно, к повышенному искрению. Интенсивность искрения зависит от величины суммарной ЭДС в коммутируемой секции

$$e_p = e_R + e_a,$$

которая не должна превосходить определённого значения.

Среднее значение реактивной ЭДС в коммутируемой секции определяется выражением

$$e_R = 2 W_C \lambda AS l_0 V_a. \quad (4.6)$$

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

$$\lambda = \left[ 0,6 \frac{2h_{п1}}{b_{п1} + b_{п2}} + \frac{l_a - l_0}{l_0} + 0,92 \lg \left( \frac{\pi t_1}{b_{щ}} \right) \right] 10^{-6}, \quad (4.7)$$

где  $b_{п1}$  и  $b_{п2}$  – максимальная и минимальная ширина паза.

ЭДС от реакции якоря при установке щёток на линии геометрической нейтралли

$$e_a = \frac{\mu_0 W_C AS \tau l_0 V_a}{\delta_a}, \quad (4.8)$$

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

$$\delta_a = \frac{\tau - b_0}{2}. \quad (4.9)$$

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:

$$b_k = b'_{щ} + \left[ u_{п1} + \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right] t'_k, \quad (4.10)$$

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

$$b'_{щ} = b_{щ} \frac{D_a}{D_k}; \quad (4.11)$$

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

$$t'_k = t_k \frac{D_a}{D_k} .$$

(4.12)

Для благоприятной коммутации необходимо

$$b_k \leq 0,8 (\tau - b_0). \quad (4.13)$$

## 5. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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.

28. Определение геометрических размеров.

Воздушный зазор:

$$\delta' = K_\delta \delta , \quad (5.1)$$

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

$$K_\delta = \frac{t_z + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} . \quad (5.2)$$

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:

$$l_{пл} = l_0 .$$

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

$$S_{пл} = \frac{\Phi_0 \sigma}{B_{пл}} , \quad (5.3)$$

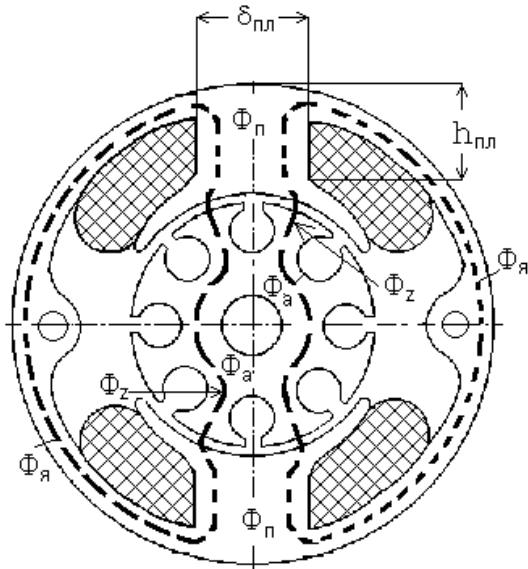
где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния магнитного потока с учетом того, что помимо основного магнитного потока по сердечнику полюса проходит поток рассеяния. Величина этого коэффициента составляет 1,08 – 1,12.

Рассчитав площадь сердечника полюса, определяют его ширину:

$$b_{пл} = \frac{S_{пл}}{l_{пл} K_{з.с}} . \quad (5.4)$$

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

Сечение магнитопровода станины рассчитывается исходя из допустимых значений магнитной индукции  $B_{ст}$  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



$$S_{ст} = 0,5 \frac{\Phi_0 \sigma}{B_{ст}} \quad (5.5)$$

Большие значения индукции рекомендуются для машин с кратковременным режимом работы.

Высота сердечника станины

$$h_{ст} = \frac{S_{ст}}{l_{ст} K_{з.с}} \quad (5.6)$$

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

П

Рис. 4. Магнитная система машины постоянного тока. По ней определяют длину отдельных участков магнитной цепи (рис. 4).

## 29. Расчёт МДС машины постоянного тока.

### МДС воздушного зазора

$$AW_{\delta} = 2 \frac{B_{\delta} \delta}{\mu_0} K_{\delta} \quad (5.7)$$

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

$$B_{z_{мин}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{z1} K_{з.с}} \quad (5.8)$$

$$B_{z_{ср}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_{zср} K_{з.с}} \quad (5.9)$$

$$B_{z_{\max}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_z K_{3.c}}; \quad (5.10)$$

Рассчитав значения магнитных индукций, по кривым намагничивания выбранного сорта электротехнической стали (прилож., табл. 5 – 13) определяют соответствующие значения напряжённостей магнитного поля  $H_{z_{\min}}$ ,  $H_{z_{\text{ср}}}$ ,  $H_{z_{\max}}$ .

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

МДС зубцовой зоны определяется по формуле Симпсона:

$$AW_z = 2 \frac{H_{z_{\min}} + 4H_{z_{\text{ср}}} + H_{z_{\max}}}{6} h_{\text{п}}. \quad (5.11)$$

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:

$$B_{z_{\max}} = \frac{B_{\delta} t_z}{b_z K_{3.c}}; \quad (5.12)$$

$$AW_z = 2 H_z h_{\text{п}}. \quad (5.13)$$

МДС сердечника якоря. Уточнённое значение магнитной индукции в сердечнике якоря

$$B_a = \frac{\Phi_o}{2h_a l_o K_{3.c}}. \quad (5.14)$$

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

$$AW_a = H_a L_a, \quad (5.15)$$

где средняя длина магнитной силовой линии

$$L_a = \pi \frac{(D_a - 2)(h_{\text{п}} - h_a)}{2p} + h_a. \quad (5.16)$$

Величина магнитной индукции в сердечнике полюса уточняется по выражению:

$$B_{\text{пл}} = \frac{\Phi_o \sigma}{b_{\text{пл}} l_{\text{пл}} K_{3.c}}. \quad (5.17)$$

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

$$AW_{\text{пл}} = 2 H_{\text{пл}} h_{\text{пл}}. \quad (5.18)$$

МДС станины. Магнитная индукция в станине

$$B_{\text{ст}} = \frac{\Phi_o \sigma}{2 h_{\text{ст}} K_{3.с}}. \quad (5.19)$$

Средняя длина магнитной силовой линии в станине

$$L_{\text{ст}} = \pi \frac{D_a + 2\delta + 2 h_{\text{пл}}}{2p}. \quad (5.20)$$

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

$$AW_{\text{ст}} = H_{\text{ст}} L_{\text{ст}}. \quad (5.21)$$

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:

$$AW_{\delta_{\text{ст}}} = 2 \frac{B_{\text{пл}}}{\mu_o} \delta_{\text{ст}}. \quad (5.22)$$

Результирующая МДС машины на пару полюсов в режиме холостого хода

$$AW_{\text{в}} = AW_{\delta} + AW_z + AW_a + AW_{\text{пл}} + AW_{\text{ст}} + AW_{\delta_{\text{ст}}}. \quad (5.23)$$

30. 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.

Расчёт х.х.х производится в такой последовательности:

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

$$\Phi_o = \frac{60 E a}{p N n}; \quad (5.24)$$

- рассчитываются соответствующие значения магнитной индукции в воздушном зазоре с использованием выражения (2.1);

- рассчитываются значения МДС для всех участков магнитной цепи и суммарная МДС возбуждения на пару полюсов в соответствии с выражениями п.29.

Производимые расчёты сводятся в таблицу (табл. 3, по данным которой строится зависимость  $E = f(AW_{\text{в}}) - \text{х.х.х.}$ ).

31. МДС реакции якоря. При работе МПТ под нагрузкой по обмотке якоря протекает ток и вокруг 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.

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						

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:

$$AW_R = AW_{aq} - AW_{ad} - AW_k, \quad (5.25)$$

для генераторов

$$AW_R = AW_{aq} + AW_{ad} + AW_k, \quad (5.26)$$

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

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

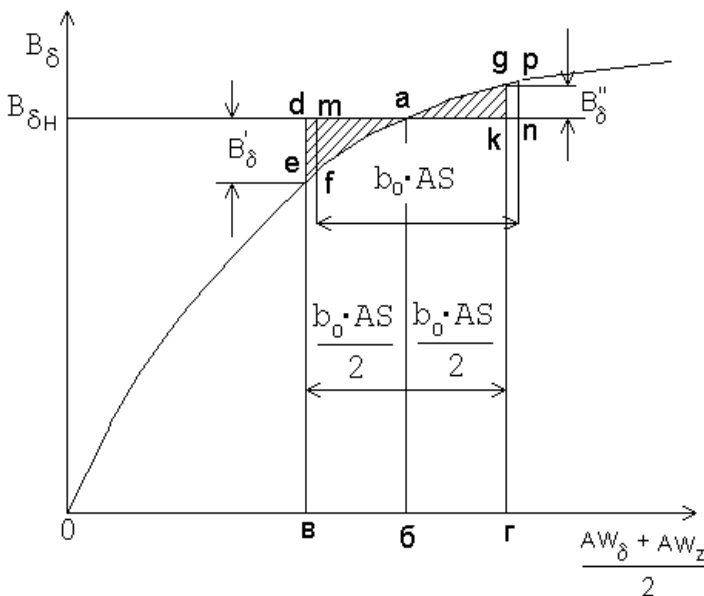
$AW_k$  – коммутационная МДС.

Так как поперечный магнитный поток замыкается через зубцовую зону и воздушный зазор машины, для определения поперечной реакции якоря используется переходная кривая намагничивания (рис. 5):

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

которая строится по данным табл. 3. На этой кривой по оси ординат откладывается номинальная величина магнитной индукции в воздушном зазоре (точка а) и определяется соответствующая номинальная МДС (точка б). Влево и вправо от этой точки в масштабе МДС откладываются отрезки бв и бг, изображающие

МДС поперечной реакции якоря:



$$|bv| = |bg| = AS \cdot b_0 / 2. \quad (5.27)$$

Рис.5. Переходная характеристика машины постоянного тока



Так как величины отрезков  $bв$  и  $bг$  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  $амф$  и  $арп$  стали равными. Тогда величина МДС на пару полюсов, компенсирующая поперечную реакцию якоря, определяется выражением

$$AW_{aq} = 2 mn.$$

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:

$$AW_{aq} \approx \frac{B'_\delta - B''_\delta}{6(B'_\delta + B''_\delta)} AS b_0. \quad (5.28)$$

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

$$AW_{ad} = 2 b_\beta AS, \quad (5.29)$$

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:

$$AW_K = \frac{b_K AS_H}{1 + K_K} \left( 1 + \frac{0,2\pi\tau}{\delta_a \lambda} 10^{-6} \right), \quad (5.30)$$

где  $b_K$  – ширина коллекторной пластины;

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

$K_K$  – коэффициент, учитывающий падение напряжения в щётках

$$K_K = \frac{1,7\Delta U_{щ}}{4W_c V_a \lambda AS_H I_o}. \quad (5.31)$$

Полная МДС возбуждения МПТ при нагрузке

$$AW_{\Sigma \text{НАГР}} = AW_{\delta} + AW_z + AW_a + AW_{\text{пл}} + AW_{\text{ст}} + AW_{\delta \text{СТ}} + AW_R. \quad (5.32)$$

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

$$E = U - \Delta U_a - \Delta U_{\text{щ}} \quad (5.33)$$

и для генераторов

$$E = U + \Delta U_a + \Delta U_{\text{щ}}. \quad (5.34)$$

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

$$AW_{\Sigma \text{НАГР}} = AW'_{\Sigma \text{НАГР}} + AW_R. \quad (5.35)$$

## 6. РАСЧЁТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

### 6.1. Электродвигатель последовательного возбуждения

#### 32. Число витков обмотки возбуждения на один полюс

$$W_B = \frac{AW_{\Sigma \text{НАГР}}}{2I_a}. \quad (6.1)$$

#### 33. Предварительное сечение обмоточного провода для обмотки возбуждения

$$S_B = I_a / j_B, \quad (6.2)$$

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

$$M_H = 9,55 P_H / n_H. \quad (6.3)$$

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

$$j_B = I_a / S_B. \quad (6.4)$$

#### 34. Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии

$$R_B = K_B \frac{2\rho W_B l_{\text{ср}}}{\gamma_M S_B}, \quad (6.5)$$

где  $l_{\text{ср}}$  – 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.

#### 35. Падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U_B = I_a R_B. \quad (6.6)$$

36. Величина ЭДС якоря двигателя последовательного возбуждения при нагрузке

$$E = U_H - \Delta U_a - \Delta U_{\text{щ}} - \Delta U_B. \quad (6.7)$$

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

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  $E_a$ .

37. Площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$S'_{\text{в.окна}} = \frac{W_B d_{\text{в.из}}^2}{f_0}, \quad (6.8)$$

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 концевиком.

## 6.2. МПТ с независимым возбуждением

Расчёт обмотки возбуждения в этом случае производится в такой последовательности:

38. Задаются величиной тока возбуждения

$$I_B \approx (5 \div 10)\% I_a.$$

Большие значения тока принимаются для машин меньшей мощности.

Исходя из режима работы МПТ и её исполнения, по данным табл. 4 выбирается величина допустимой плотности тока в обмотке возбуждения  $j_B$ . После этого рассчитывают сечение провода обмотки возбуждения по выражению

$$S_B = I_B / j_B. \quad (6.9)$$

По найденному значению  $S_B$  выбирается марка, сечение и диаметр провода обмотки возбуждения, соответствующего ГОСТу.

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

$$W_B = \frac{AW_{\Sigma \text{НАГР}}}{2I_B}. \quad (6.10)$$

40. По выражению (6.5) 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.

## 7. ПОТЕРИ И КПД МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В МПТ различают следующие виды потерь:

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

41. Потери в обмотках якоря и возбуждения рассчитываются следующим образом:

для МПТ с последовательным возбуждением

$$\Delta P_{Ma} = I_a^2 R_a; \quad (7.1)$$

$$\Delta P_{MB} = I_a^2 R_B; \quad (7.2)$$

для машин с параллельным возбуждением

$$\Delta P_{MB} = U_H I_B. \quad (7.3)$$

42. Потери в щётках

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} I_a. \quad (7.4)$$

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

Масса стали якоря

$$G_{c.a} = 7800 [\pi (D_a - 2 h_{\Pi})^2 l_0] / 4. \quad (7.5)$$

Масса зубцов якоря

$$G_{c.z} = 7800 Z b_{z.c.p} h_{\Pi} l_0. \quad (7.6)$$

Потери в стали сердечника якоря

$$\Delta P_{c.a} = \rho_{уд} B_a^2 f^{1.3} G_{c.a}. \quad (7.7)$$

Потери в зубцах якоря

$$\Delta P_{c.z} = \rho_{уд} B_z^2 f^{1.3} G_{c.z}. \quad (7.8)$$

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

Потери в стали статора

$$\Delta P_c = \Delta P_{c.a} + \Delta P_{c.z}. \quad (7.9)$$

44. 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

$$\Delta P_{тр.щ} = 9,81 K_{тр} P_{щ} S_{щ} V_k, \quad (7.10)$$

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

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

$S_{щ}$  – поверхность всех щёток;

$V_k$  – окружная скорость коллектора.

Потери на трение в шарикоподшипниках

$$\Delta P_{тр.под} = K_{ш} G_a n \cdot 10^{-3}. \quad (7.11)$$

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

Масса якоря  $G_a$  может быть рассчитана по приближенной формуле

$$G_a = 1000 \pi (D_a^2 l_0 \gamma_a + D_k^2 l_k \gamma_k) / 4. \quad (7.12)$$

В этом выражении средняя объемная масса якоря  $\gamma_a = 7800 \text{ кг/м}^3$ , объемная 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

$$\Delta P_{\text{тр.в}} = 2 D_a^3 n^3 l_0 \cdot 10^{-6}; \quad (7.13)$$

при  $n > 12000$  об/мин

$$\Delta P_{\text{тр.в}} = 0,3 D_a^5 (1 + l_0 / D_a) n^3 \cdot 10^{-6}. \quad (7.14)$$

Полные механические потери

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{тр.щ}} + \Delta P_{\text{тр.под}} + \Delta P_{\text{тр.в}}. \quad (7.15)$$

45. Полные потери в машине

$$\Delta P_{\Sigma} = \zeta_0 (\Delta P_{\text{ма}} + \Delta P_{\text{мв}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}}), \quad (7.16)$$

где коэффициент  $\zeta_0 = 1,1 - 1,2$  учитывает добавочные потери.

46. При номинальной нагрузке КПД для двигателя

$$\eta_H = \frac{U_H I_H - \Delta P_{\Sigma}}{U_H I_H} 100\%. \quad (7.17)$$

КПД для генератора

$$\eta_H = \frac{U_H I_H}{U_H I_H + \Delta P_{\Sigma}} 100\%. \quad (7.18)$$

В выражениях (7.17), (7.18)  $I_H = I_a$  – для электродвигателей последовательного возбуждения;  $I_H = I_a + I_b$  – для электродвигателей параллельного возбуждения;  $I_H = I_a - I_b$  – для генераторов параллельного возбуждения.

Если номинальная мощность электродвигателя

$$P_H = U_H I_H - \Delta P_{\Sigma}$$

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

$$I_a = 0,5 A - (0,25 A^2 - B). \quad (7.19)$$

Для электродвигателей последовательного возбуждения

$$A = \frac{U / \xi_0 - \Delta U_{\text{щ}}}{R_a + R_b}; \quad B = \frac{P / \xi_0 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}}}{R_a + R_b}; \quad (7.20)$$

для электродвигателей параллельного возбуждения

$$A = \frac{U / \xi_0 - \Delta U_{\text{щ}}}{R_a}; \quad B = \frac{P / \xi_0 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + U I_b (1 - 1 / \xi_0)}{R_a}. \quad (7.21)$$

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

47. 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

$$M = \frac{pN}{2a\pi} \Phi I. \quad (7.22)$$

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 табл. 5 строятся рабочие характеристики электродвигателя в общих координатных осях (рис. 6).

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				

48. Для генератора постоянного тока параллельного возбуждения строится внешняя характеристика – зависимость напряжения от тока нагрузки  $U = f(I)$  при  $R_B = \text{const}$ .

Для построения внешней характеристики генератора параллельного возбуждения необходимо иметь характеристику холостого хода  $E = f(I_B)$ , которая строится по кривой  $E = f(AW_B)$  при известном числе витков обмотки возбуждения. Совместно с характеристикой холостого хода в тех же осях строится вольт-амперная характеристика цепи возбуждения  $U_B = I_B R_B$ .

В точке пересечения этих характеристик (рис.7) имеем режим холостого хода, когда ток якоря  $I_a$  равен нулю, а напряжение равно напряжению холостого хода  $U_0$ . Указанная точка является первой точкой внешней характеристики генератора. С ростом тока якоря возрастает падение напряжения в якорной цепи  $\Delta U_a = I_a R_a + \Delta U_{\text{щ}}$  и МДС реакции якоря. Эти величины являются катетами прямоугольного треугольника  $\Delta ABC$ , называемого характеристическим. Одна из его вершин (точка А) лежит на характеристике холостого хода, а другая вершина (точка С) – на вольт-амперной характеристике цепи возбуждения и, кроме того, определяет величину напряжения генератора при заданном токе якоря.

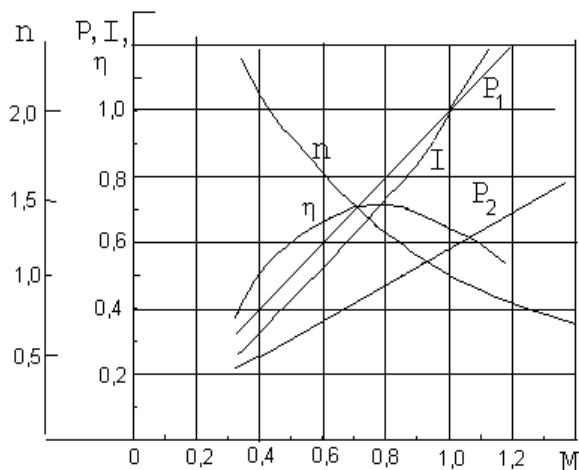


Рис.6. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения



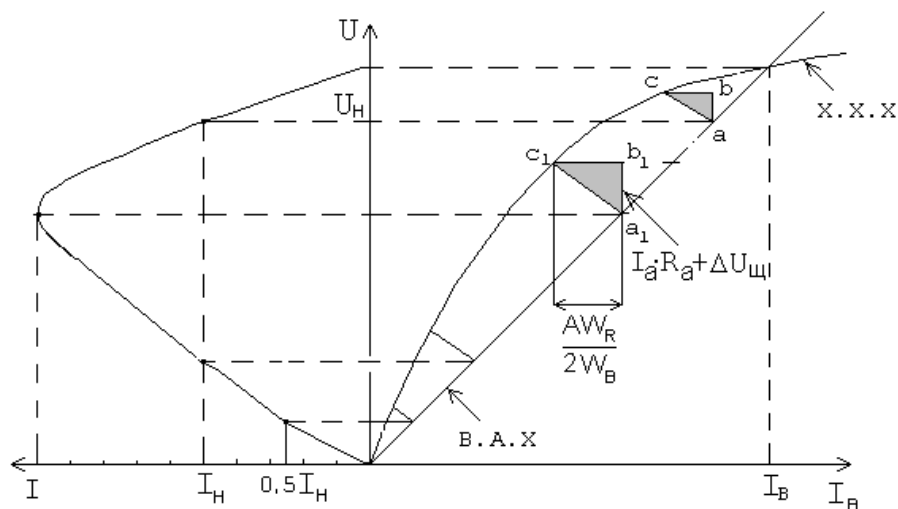


Рис.7. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Внешнюю характеристику строят таким образом:

- для номинального тока якоря определяется падение напряжения в якорной цепи  $\Delta U_a = I_a R_a + \Delta U_{щ}$  и ток возбуждения, эквивалентный реакции якоря:  $AW_R / (2 W_B)$ , т.е. катеты характеристического треугольника;
- полученный треугольник размещают между кривыми холостого хода и вольт-амперной характеристикой так, чтобы его вершины лежали на этих кривых;
- откладывая по координатной оси токов якоря его номинальную величину, а по оси ординат – величину напряжения, равную ординате нижней вершины треугольника, получают следующую точку внешней характеристики, соответствующую номинальному току;
- точки внешней характеристики, соответствующие другим значениям тока, находят аналогичным образом при построении характеристических треугольников, стороны которых пропорциональны данным значениям токов.

## 8. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

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.

49. 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

$$\Theta_a = \frac{\left(1 + \alpha_a b_{z1} \frac{\beta}{\lambda' \Pi}\right) w_{м.а} + w_{с.а} + w_{тр.в}}{\alpha_a b_{z1}}, \quad (8.1)$$

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

$$\alpha_a = \alpha' (1 + 01 V_a), \quad (8.2)$$

$\alpha'$  – 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,

$$\beta = \beta_1 + \beta_2, \quad (8.3)$$

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

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

$$\beta_2 = \frac{m_a d_{а.из}}{4 K_c}; \quad (8.4)$$

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

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

$K_c$  – коэффициент, определяемый выражением

$$K_c = 1 + 4 (d_a / d_{а.из} - 0,4); \quad (8.5)$$

$\lambda'$  – коэффициент теплопроводности междувитковой 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,

$$w_{м.а} = \frac{\Delta P_{м.а}}{Z l_a}; \quad (8.6)$$

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

$$w_{с.а} = \frac{\Delta P_c}{Z l_o}; \quad (8.7)$$

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

$$w_{\text{тр.в}} = \frac{\Delta P_{\text{тр.в}}}{Z l_0}. \quad (8.8)$$

50. Превышение температуры коллектора. Полные потери в коллекторе

$$\Delta P_K = \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{тр.щ}}. \quad (8.9)$$

Поверхность охлаждения коллектора

$$S_{\text{к.ох}} = \pi D_k l_k. \quad (8.10)$$

Среднее превышение температуры коллектора над температурой окружающей среды

$$\Theta_K = \frac{\Delta P_K}{\alpha_K (1 + 0,1 V_K) S_{\text{к.ох}}}, \quad (8.11)$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи коллектора,  $\alpha_K = 40 - 70$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

51. Превышение температуры обмотки возбуждения. Потери в одной катушке обмотки возбуждения

$$w_{\text{м.в}} = \Delta P_{\text{м.в}} / 2p. \quad (8.12)$$

Поверхность охлаждения одной катушки обмотки возбуждения для машины с отъёмными полюсами

$$S_{\text{в.ох}} = 2 (b_{\text{пл}} + l_{\text{пл}} + 4 \delta_k) h_k + 2 (b_{\text{пл}} + 2 \delta_k) \delta_k, \quad (8.13)$$

для машины с шихтованной статорной

$$S_{\text{в.ох}} = (b_0 + b_{\text{пл}} + 2l_{\text{пл}} + 8 \delta_k) h_k + (b_0 + b_{\text{пл}} + 4 \delta_k) \delta_k. \quad (8.14)$$

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

$\delta_k$  и  $h_k$  – ширина и высота катушки обмотки возбуждения.

Среднее превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды

$$\Theta_{\text{в}} = \frac{w_{\text{м.в}}}{\alpha'_0 S_{\text{в.ох}}}, \quad (8.15)$$

где  $\alpha'_0$  – коэффициент теплоотдачи катушек обмотки возбуждения, для машин закрытого исполнения  $\alpha'_0 = 26 - 30$  Вт/(м<sup>2</sup> · К); для машин защищённого исполнения с вентиляцией  $\alpha'_0 = 52 - 60$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

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

## 9. РАСЧЁТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

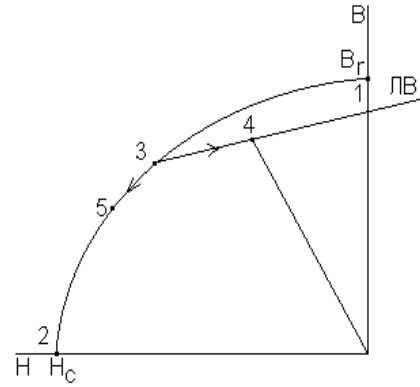
### 9.1. Кривые размагничивания постоянных магнитов

В МПТ малой мощности перспективно использование постоянных магнитов, позволяющих уменьшить габариты машин и увеличить их КПД.

Расчёт МПТ с постоянными магнитами производится теми же методами, что и машин с обмотками возбуждения. Особенностью расчёта является правильный выбор габаритов магнита при известных его параметрах.

Постоянный магнит характеризуется кривой размагничивания, снимаемой для образцов с замкнутым магнитопроводом, вид которой представлен на рис.8.

При отсутствии размагничивания режим работы магнита определяется положением точки 1 ( $B_r, 0$ ) на кривой размагничивания. Значение магнитной индукции в этой точке называется остаточной индукцией  $B_r$ . Максимальная напряжённость магнитного поля, необходимая для размагничивания магнита, называется коэрцитивной силой  $H_c$ , а режим работы магнита при этом определён положением точки 2 ( $0, H_c$ ). Если постоянный магнит имеет воздушный зазор, то магнитная индукция в зазоре и самом магните оказывается меньше остаточной, т.к. его МДС распределяется между зазором и сердечником магнита. Наличие воздушного зазора эквивалентно размагничивающему действию обмотки с током. Рабочая точка постоянного магнита с зазором оказывается смещённой, занимая положение точки 3 на кривой размагничивания.



постоянного магнита

При повторном намагничивании в силу необратимых процессов, произошедших в магните, намагничивание происходит не по основной кривой, а по частному циклу (точки 3,4). Для расчётов частные циклы заменяются прямой линией, называемой линией возврата (ЛВ). Характер процессов размагничивания магнита определяется величиной МДС размагничивания. При малых значениях МДС размагничивание происходит по линии возврата до точки 3. Если же МДС значительна, то процесс размагничивания вначале происходит по линии возврата до точки 3, а затем — по основной кривой размагничивания (точка 5). Последующие режимы намагничивания в этом случае будут происходить по новой линии возврата, проходящей через точку 5.

Магнитная цепь МПТ рассчитывается так, чтобы рабочая точка лежала на середине прямой возврата, а возможные колебания МДС не выводили её за пределы данной линии возврата.

Наклон линии возврата определяется магнитной проницаемостью возврата

$$\mu_B = \Delta B / \Delta H. \quad (9.1)$$

Значения  $\mu_B$  с достаточной точностью определяются наклоном касательной к кривой размагничивания в точке ( $B_r, 0$ ).

Различным точкам на кривой размагничивания соответствуют различные величины удельной энергии магнита:

$$W_M = 0,5 B H. \quad (9.2)$$

Зависимость удельной энергии от напряжённости магнита представлена на рис.9. Как видно из рисунка, при некотором значении напряжённости  $H_0$

наблюдается максимум удельной энергии в точке  $A$  с координатами  $(B_0, H_0)$ . Магнитная система должна проектироваться так, чтобы рабочий режим магнита находился вблизи точки максимума.

Для расчётов магнитных систем с постоянными магнитами необходимо иметь аналитическое описание кривой размагничивания. Наиболее часто эта зависимость представляется в виде гиперболы:

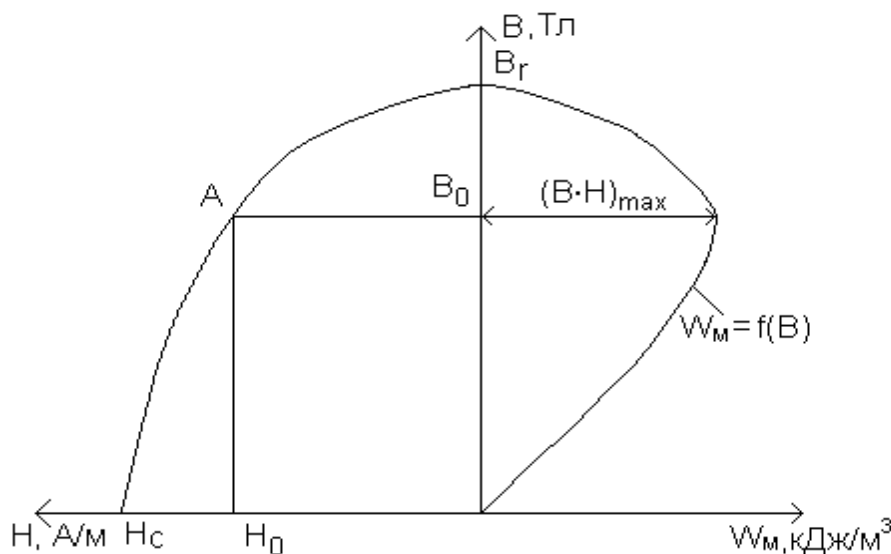
$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - a H}. \quad (9.3)$$

В этом выражении коэффициент  $a$  зависит от формы кривой размагничивания и выражается через коэффициент формы  $\gamma$  следующим образом:

$$a = \frac{B_R}{B_S} = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma}, \quad (9.4)$$

где

$$\gamma = \frac{B_0 H_0}{B_r H_c},$$



(9.5)

Рис.9. Удельная энергия постоянного магнита

$B_0$  и  $H_0$  – координаты точки, соответствующие максимуму энергии постоянного магнита на кривой размагничивания.

Величина коэффициента формы кривой размагничивания постоянных магнитов  $0,25 \leq \gamma \leq 0,9$ .

При  $\gamma = 0,25$  коэффициент  $a = 0$  и гипербола вырождается в прямую

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c}, \quad (9.6)$$

показанную на рис. 10 (кривая 1).

При  $\gamma = 1$  коэффициент  $a = 1$  и уравнение гиперболы принимает вид

$$B = B_r,$$

т.е. имеем горизонтальную прямую, касательную к кривой размагничивания.

При  $\gamma = 0,5$  коэффициент  $a = 0,8$  и гипербола становится близкой к окружности (кривая 3 на рис.10).

Коэффициент формы кривой размагничивания определяется материалом постоянного магнита, и для бариевых магнитов  $\gamma = 0,316 - 0,390$ , для метоллокерамики  $\gamma = 0,36 - 0,64$ , для сплавов ЮНДК  $\gamma = 0,5 - 0,9$ , для магнитов на основе редкоземельных элементов  $\gamma = 0,27 - 0,3$ .

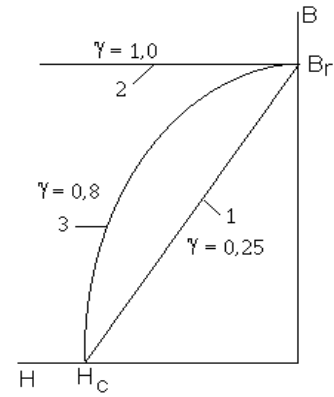


Рис. 10. Аналитическое представление кривой размагничивания постоянного магнита

## 9.2. Совместная работа постоянных магнитов с внешней магнитной цепью

Простейшая магнитная цепь состоит из постоянного магнита, двух воздушных зазоров и внешнего магнитопровода.

Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, состоит из основного потока, проходящего через воздушные зазоры и внешний магнитопровод, и потока рассеяния, замыкающегося по воздуху, между полюсами магнита.

Эти потоки по отношению к магниту являются внешними, и их сумма должна быть равной потоку постоянного магнита

$$\Phi_M = \Phi_{BH} = \Phi_\delta + \Phi_\sigma. \quad (9.7)$$

Величина потока рассеяния принимается пропорциональной МДС магнита:

$$\Phi_\sigma = \lambda_\sigma F_M. \quad (9.8)$$

Согласно закону полного тока для магнитной цепи справедливо соотношение

$$2 H_M l_M + 2 H_\delta \delta + 2 H_{CT} l_{CT} = 0, \quad (9.9)$$

где  $l_M$  и  $l_{CT}$  – половина длины магнита внешнего магнитопровода. В этом случае

$$F_M = -(F_\delta + F_{CT}) \text{ или по модулю } |F_M| = |F_\delta + F_{CT}|. \quad (9.10)$$

Поскольку магнитный поток пропорционален магнитной индукции, а напряжённость магнитного поля – МДС, то кривую размагничивания постоянного магнита можно изобразить в координатных осях  $(\Phi, F)$ . В этих же осях можно построить зависимости  $\Phi_\delta = f(F_{BH})$  и  $\Phi_\sigma = f(F_M)$ :

$$F_{BH} = H_\delta \delta + H_{CT} l_{CT} = \frac{\Phi_\delta \delta}{\mu_0 S_\delta} + \frac{\Phi_\sigma l_{CT}}{\mu_{CT} S_{CT}}. \quad (9.11)$$

Для последовательно включенных участков  $\Phi_{CT} = \Phi_{\delta}$ , поэтому указанное выражение записывается в виде

$$F_{BH} = \Phi_{\delta} \left( \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}} + \frac{I_{CT}}{\mu_{CT} S_{CT}} \right), \quad (9.12)$$

отсюда

$$\Phi_{\delta} = \frac{F_{BH}}{\frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}} + \frac{I_{CT}}{\mu_{CT} S_{CT}}}. \quad (9.13)$$

Полученная зависимость нелинейна, так как по мере увеличения магнитной индукции материала внешнего магнитопровода его магнитная проницаемость падает (кривая  $\Phi_{\delta}(F_{BH})$  на рис.11).

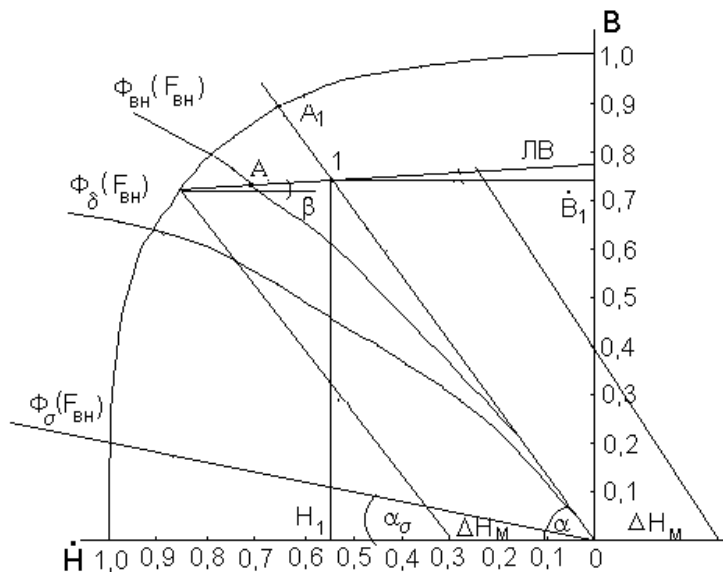
При выполнении условия (9.7) поток рассеяния пропорционален внешней МДС:

$$\Phi_{\sigma} = \lambda_{\sigma} F_M = \lambda_{\sigma} F_{BH}, \quad (9.14)$$

и эта зависимость может быть построена в тех же координатных осях (кривая  $\Phi_{\sigma}(F_{BH})$  на рис.11).

Просуммировав ординаты указанных кривых, построим ту же зависимость (9.7) с учётом нелинейности

Рис. 11. Совместная работа постоянного магнита с внешней магнитной цепью



$$\Phi_{BH} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma} = f(F_{BH}).$$

Совместная работа постоянного магнита и внешней магнитной цепи возможна согласно (9.7) и (9.10) при равенстве магнитных потоков и МДС, т.е. в точке пересечения линии возврата магнита и вебер-амперной характеристики внешней магнитной цепи (точка A на рис.11).

В тех случаях, когда внешняя магнитная цепь не насыщена, вебер-амперная характеристика изображается прямой, проведённой относительно оси абсцисс под углом

$$\alpha = \operatorname{arctg} \lambda_{\text{вн}} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} + \frac{l_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}} S_{\text{ст}}}}, \quad (9.15)$$

где  $\lambda_{\text{вн}}$  – магнитная проводимость внешней магнитной цепи.

Совместная работа магнита и внешней цепи соответствует рабочей точке 1 с координатами  $(H_1, B_1)$ .

Если магнитная цепь имеет обмотку, по которой протекает ток, то к МДС магнита будет добавляться МДС обмотки  $-\Delta F$ . Эта МДС не влияет на характеристики внешней магнитной цепи. Поэтому для учёта её влияния достаточно сместить вебер-амперную характеристику внешней цепи  $\Phi_{\text{вн}} = f(F_{\text{вн}})$  параллельно самой себе на величину  $\Delta F$  в зависимости от её полярности. Случай размагничивания показан на рис. 11.

Для того чтобы МДС обмотки не вызывала размагничивания постоянного магнита, необходимо ограничить её величину:  $\Delta F < F_{\text{РАЗМ}}$ .

Подмагничивание магнита не вызывает ухода рабочей точки с линии возврата, и величина МДС обмотки в этом случае не ограничивается.

Таким образом, задача расчёта магнитной цепи заключается в том, чтобы, зная характеристики постоянного магнита, внешней магнитной цепи и величину размагничивающей МДС обмотки, выбрать положение рабочей точки, обеспечивающей максимум энергии, или, другими словами, минимальный объём магнита.

### 9.3. Расчёт оптимальных параметров постоянного магнита

Пусть задана кривая размагничивания постоянного магнита

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - aH},$$

с известными параметрами  $B_r$ ,  $H_c$ ,  $a$ .

Введём относительные величины:

$$\dot{B} = \frac{B}{m_B}; \quad \dot{H} = \frac{H}{m_H}; \quad \dot{\mu} = \frac{\mu}{m_\mu}; \quad \dot{\Phi} = \frac{\Phi}{m_\Phi}; \quad \dot{F} = \frac{F}{m_F}; \quad \dot{\lambda} = \frac{\lambda}{m_\lambda}; \quad \dot{W} = \frac{W}{m_W},$$

где в качестве масштабов выбраны  $m_B = B_r$ ;  $m_H = H_c$ ;  $m_\mu = B_r / H_c$ ;  $m_\Phi = B_r S_M$ ;  $m_F = H_c l_M$ ;  $m_\lambda = m_\Phi / m_F$ ;  $m_W = B_r H_c / 2$ .

Кривая размагничивания в относительных единицах записывается в виде

$$\dot{B} = \frac{1 - \dot{H}}{1 - a\dot{H}}. \quad (9.16)$$

Допустим, что рабочая точка магнита, положение которой необходимо определить, изображается на рис. 12 точкой 1. Положение этой точки, как было показано выше, соответствует точке пересечения линии возврата и вебер-



амперной характеристики внешней цепи. При отсутствии насыщения наклон последней определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda_{\text{вн}}. \quad (9.17)$$

Линия возврата проходит под углом

$$\beta = \operatorname{arctg} \dot{\mu}_B, \quad (9.18)$$

причём относительная проницаемость возврата связана с формой кривой размагничивания соотношением

$$\dot{\mu}_B = 1 - a. \quad (9.19)$$

Положим, что задана максимальная размагничивающая МДС и соответствующая ей напряжённость магнитного поля  $\Delta \dot{H}_M$ .

Выражая координаты рабочей точки 1 через координаты точки 2, лежащей на кривой размагничивания, подставляя полученные выражения в уравнение кривой размагничивания (9.16) и решая его относительно индукции, в окончательном виде получим

$$\dot{B}_1 = \frac{1 - \dot{B}_2 \lambda_{\text{вн}}^{-1} - \Delta \dot{H}_M}{1 - a \dot{B}_2 \lambda_{\text{вн}}^{-1} - a \Delta \dot{H}_M} + \Delta \dot{H}_M \dot{\mu}_B. \quad (9.20)$$

Определим удельную энергию магнита в рабочей точке:

$$\dot{W}_1 = \dot{B}_1 \dot{H}_1 = \frac{\dot{B}_1^2}{\lambda_{\text{вн}}}. \quad (9.21)$$

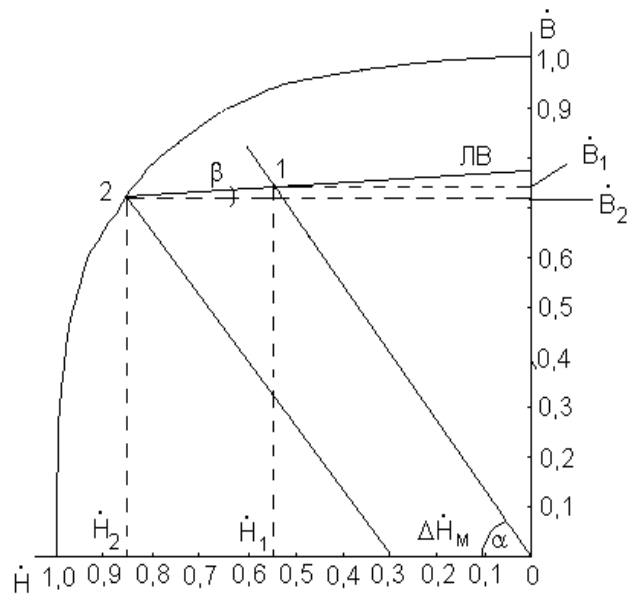


Рис.12. К расчёту оптимальных размеров магнита постоянного тока

Подставляя (9.20) в (9.21) и исследуя полученную функцию на экстремум, определим оптимальную магнитную проводимость внешней цепи, соответствующую максимуму энергии магнита:

$$\lambda_{\text{вн.опт}} = \frac{a^{-1} + \Delta \dot{H}_M \dot{\mu}_B}{a^{-1} - \Delta \dot{H}_M}. \quad (9.22)$$

Используя выражение (9.13), выразим  $\lambda_{\text{вн.опт}}$  через параметры внешней магнитной цепи:

$$\lambda_{\text{вн.опт}} = \frac{K_{\sigma} H_c l_M}{B_R S_M \left( \frac{\delta}{\mu_0 S_M} + \frac{l_{\text{СТ}}}{\mu_{\text{СТ}} S_M} \right)}. \quad (9.23)$$

Отсюда при известной площади магнита находят его длину:

$$l_M = \lambda_{\text{вн.опт}} \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{K_{\sigma}} \left( \frac{S_M}{S_{\delta}} + \frac{S_M l_{\text{СТ}}}{S_{\text{СТ}} \delta} \frac{\mu_0}{\mu_{\text{СТ}}} \right). \quad (9.24)$$

Если пренебречь падением магнитного потенциала во внешнем магнитопроводе, т.е. считать  $\mu_{\text{СТ}} = \infty$ , то полученное выражение упрощается и принимает вид:

$$\frac{l_M}{\delta} = \lambda_{\text{вн.опт}} \frac{1}{\mu_0} \frac{S_M}{S_{\delta}}. \quad (9.25)$$

При равенстве площадей магнитного зазора и магнита будем иметь

$$\frac{l_M}{\delta} = \lambda_{\text{вн.опт}}. \quad (9.26)$$

Величина относительной магнитной индукции при оптимальном режиме постоянного магнита записывается в виде

$$\dot{B}_1 = \left( a^{-1} - \Delta \dot{H}_M \right) \lambda_{\text{вн.опт}} - \sqrt{\lambda_{\text{вн.опт}}^2 \left[ \left( a^{-1} \right)^2 - a^{-1} \right]}, \quad (9.27)$$

а относительная напряжённость магнитного поля при этом

$$\dot{H}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\lambda_{\text{вн.опт}}}. \quad (9.28)$$

Пример № 1. Постоянный магнит из сплава ЮНДК имеет следующие характеристики:  $B_r = 1,02$  Тл;  $H_c = 110$  кА/м;  $\gamma = 0,6417$ . Величина относительной напряжённости размагничивающего магнитного поля  $\Delta \dot{H}_M = 0,3$ . Магнитная проницаемость материала внешней магнитной цепи равна бесконечности, а площади поперечного сечения магнита и зазора одинаковы.

Определить отношение длины магнита к длине воздушного зазора для оптимально выбранной рабочей точки.

**Р е ш е н и е.** Коэффициент, характеризующий форму кривой размагничивания,

$$a = \frac{2\sqrt{0,6417} - 1}{0,6417} = 0,938.$$

Относительная проницаемость возврата

$$\dot{\mu}_B = 1 - a = 0,062.$$

Оптимальная проводимость внешней цепи в относительных единицах

$$\lambda_{\text{вн.опт}} = \frac{a^{-1} + \dot{\mu}_B \Delta \dot{H}_M}{a^{-1} - \Delta \dot{H}_M} = \frac{1/0,938 + 0,062 \cdot 0,3}{1/0,938 - 0,3} = 1,4158.$$

Масштаб магнитной проницаемости

$$m_{\mu} = B_r / H_c = 1,02 / (110 \cdot 10^3) = 9,2727 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Магнитная проницаемость воздушного зазора в относительных единицах

$$\mu_o = \frac{\mu_o}{m_{\mu}} = \frac{1,256 \cdot 10^6}{9,2727 \cdot 10^{-6}} = 0,1354 .$$

Отношение длины магнита к длине воздушного зазора:

$$\frac{l_M}{\delta} = \frac{\lambda_{\text{вн.опт}}}{\mu_o} = \frac{1,4158}{0,1354} \approx 14,6 .$$

Относительная магнитная индукция:

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 = \left( a^{-1} - \dot{H}_M \right) \lambda_{\text{вн.опт}} - \sqrt{\lambda_{\text{вн.опт}} \left[ \left( a^{-1} \right)^2 - a^{-1} \right]} = \left( \frac{1}{0,938} - 0,3 \right) 1,4158 - \\ - \sqrt{1,4158 \left[ \left( \frac{1}{0,938} \right)^2 - \frac{1}{0,938} \right]} = 0,768 . \end{aligned}$$

Относительная напряжённость магнитного поля

$$\dot{H}_1 = \frac{\dot{B}_1}{\lambda_{\text{вн.опт}}} = \frac{0,76}{1,4158} = 0,5428 .$$

Относительная удельная энергия магнита

$$\dot{W}_1 = 0,5 \dot{B}_1 \dot{H}_1 = 0,5 \cdot 0,76 \cdot 0,5428 = 0,208 .$$

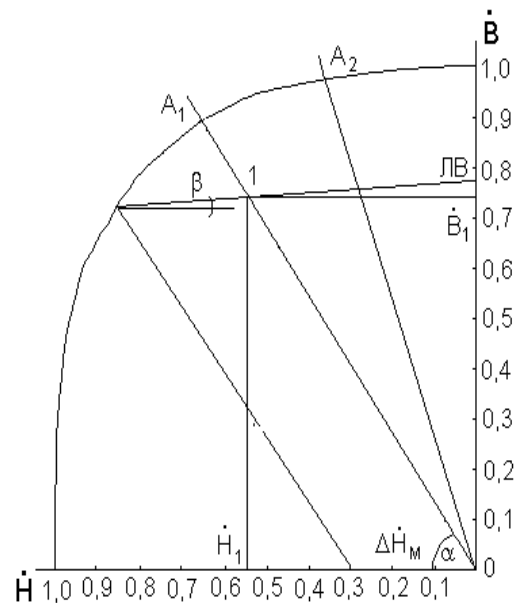
Графическое построение решения задачи представлено на рис. 13 .

При заданной величине внешнего размагничивания  $\Delta \dot{H}_M$  режим работы магнита в точке 1 будет оптимальным. При увеличении магнитной проводимости внешней цепи свыше оптимального значения (например, вебер-амперная характеристика, изображаемая прямой  $OA_2$ ) удельная энергия магнита уменьшается. При данном значении магнитной проводимости внешней цепи относительные значения магнитной индукции напряжённости магнитного поля и удельной энергии магнита соответственно равны:

$$B_1 = 0,75; H_1 = 0,28; W_1 = 0,5; B_1 H_1 = 0,105.$$

Уменьшение магнитной проводимости внешней цепи недопустимо, так как при этом уменьшается величина  $\Delta \dot{H}_M$ .

Рис. 13. Графическое построение решения примера № 1



Пример №2. Внешняя магнитная цепь и внешнее размагничивание имеют те же, что в примере1, параметры и величины. Определить отношение длины магнита к длине воздушного зазора, если использовать магнит на основе редкоземельных элементов типа КС 37А с параметрами:

$$B_r = 0,82 \text{ Тл}; \quad H_c = 560 \text{ кА}; \quad \gamma = 0,28.$$

**Р е ш е н и е.** Коэффициент, характеризующий форму кривой размагничивания,

$$a = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma} = \frac{2\sqrt{0,28} - 1}{0,28} = 0,208.$$

Относительная магнитная проницаемость возврата

$$\mu_B = 1 - a = 1 - 0,208 = 0,792.$$

Оптимальная магнитная проводимость внешней цепи

$$\lambda_{\text{вн.опт}} = \frac{a^{-1} + \mu_B \Delta \dot{H}_M}{a^{-1} - \Delta \dot{H}_M} = \frac{\frac{1}{0,208} + 0,792 \cdot 0,3}{\frac{1}{0,208} - 0,3} = 1,119.$$

Относительная магнитная проницаемость воздушного зазора

$$\mu_0 = \frac{H_c}{B_r} = \frac{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 560 \cdot 10^3}{0,82} = 0,857.$$

Отношение длины магнита к длине воздушного зазора

$$\frac{l_M}{\delta} = \frac{\lambda_{\text{вн.опт}}}{\mu_0} = \frac{1,119}{0,857} = 1,306.$$

Сравнивая между собой магниты ЮНДК с магнитами на основе редкоземельных элементов, видим, что объём последних при прочих равных условиях в  $\approx 11$  раз меньше. Такое положение объясняется значительно большими удельными энергиями последних.

## 10. ПРИМЕР РАСЧЁТА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исходные данные для расчёта:  
 машина постоянного тока – генератор;  
 полезная мощность –  $P_H = 80$  Вт;  
 номинальное напряжение –  $U_H = 230$  В;  
 частота вращения –  $n_H$ , об/мин;  
 возбуждение – параллельное;  
 режим работы – S1, продолжительный;  
 исполнение – закрытое.

### 10.1. Основные размеры машины

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
1	Магнитная индукция в зазоре	Табл. 2	$B_\delta = 0,45$ Тл
2	Линейная токовая нагрузка	Табл. 2	$AS = 8000$ А/м
3	Коэффициент полюсной дуги	Разд. 1, п.3	$\alpha = 0,65$
4	Отношение длины якоря к его диаметру	Разд. 1, п.3	$\xi = 1,4$
5	КПД генератора (предварительно)	Табл. 1	$\eta_H = 0,59$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
6	Машинная постоянная	(1.11)	$C = \frac{6}{0,65 \cdot 0,45 \cdot 8000} = 2,564 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{Вт} \cdot \text{с})$
7	Расчётная мощность	(1.6)	$P_a = 80 \cdot \frac{1 + 0,59}{2 \cdot 0,59} = 107,8$ Вт
8	Диаметр якоря	(1.12)	$D = \sqrt[3]{\frac{2,564 \cdot 10^{-3} \cdot 107,8}{1,4 \cdot 3000}} = 0,04$ м
9	Длина якоря	(1.13)	$l_0 = 1,4 \cdot 0,04 = 0,056$ м
10	Окружная ско-	(1.14)	$V_a = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3000 / 60 = 6,283$ м/с

	рость		
11	Число полюсов		$2 p = 2$
12	Полюсное деление	(1.15)	$\tau = 3,14 \cdot 0,04 / 2 = 0,0628 \text{ м}$
13	Расчётная полюсная дуга	(1.16)	$b_0 = 0,65 \cdot 0,0628 = 0,0408 \text{ м}$
14	Частота перемагничивания	(1.17)	$f = 1 \cdot 3000 / 60 = 50 \text{ Гц}$
15	Воздушный зазор	(1.22)	$\delta = 0,4 \cdot 0,0628 \cdot 8000 / 0,45 = 4,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , принимаем $\delta = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

## 10.2. Расчёт обмотки якоря

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
16	Магнитный поток	(2.1)	$\Phi = 0,45 \cdot 0,0408 \cdot 0,056 = 1,028 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$
17	Ток якоря	(1.9)	$I_a = 1,1 \cdot 80 / 230 = 0,382 \text{ А}$
18	Число параллельных ветвей		$2 a = 2$
19	Число проводников обмотки якоря	(1.10), (2.2)	$N = \frac{60 \cdot 1 \cdot 282,2}{1 \cdot 3000 \cdot 1,028 \cdot 10^{-3}} = 5490$
20	Число пазов якоря	(2.3)	$Z \approx 4 \cdot 0,04 \cdot 100 = 16$
21	Число коллекторных пластин	(2.4)	$K = 3 \cdot 16 = 48$
22	Число витков в секции обмотки	(2.5)	$W_c = 5490 / (2 \cdot 48) = 57,16$ ; принимаем $W_c = 56$
23	Уточнённое число проводников якоря		$N = 2 \cdot 48 \cdot 56 = 5376$
24	Число проводников в пазу		$N_{\text{п}} = 5376 / 16 = 336$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
25	Расчёт шагов обмотки якоря		Принята простая петлевая обмотка
26	Число элементарных пазов	(2.4)	$Z_3 = 3 \cdot 16 = 48$
	Шаг по коллектору	(2.6)	$y_k = 1$
	Шаг по якорю	(2.6)	$y = y_k = 1$
	Первый частичный шаг	(2.6)	$y_1 = 48 / (2 \cdot 1) = 24$
	Второй частичный шаг	(2.6)	$y_2 = 1 - 24 = -23$

10.3. Расчёт проводников якорной обмотки,  
размеров зубцов, пазов якоря

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
27	Предельная температура перегрева обмотки якоря		$\Theta_M = 90^\circ \text{C}$
28	Коэффициент теплоотдачи поверхности якоря		$\alpha = 18 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$
29	Удельная тепловая нагрузка	(3.1)	$q = 90 \cdot 18 (1 + 0,1 \cdot 6,28) = 2637,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$
30	Допустимая плотность тока в обмотке якоря	(3.10)	$j_a = 17 \cdot 2637,4 \cdot 10^6 / 8175,3 = 5,48 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2$
31	Сечение проводника обмотки якоря	(3.16)	$q_{\text{пр}} = 0,382 / (2 \cdot 5,48 \cdot 10^6) = 0,0348 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
32	Диаметр неизолированного провода (предварительно)	Приложение, табл. 2,3	$d_{\text{пр}} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; принимаем провод марки ПЭТВ-1: диаметр неизолированного провода $d_{\text{пр}} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; диаметр изолированного провода $d_{\text{из}} = 0,235 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; сечение провода $q_{\text{пр}} = 0,0346 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
33	Уточнённое значение плотности тока		$j_a = 0,382 / (2 \cdot 0,0346 \cdot 10^{-6}) = 5,52 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2$
34	Сечение изолированного провода	(3.19)	$q_{\text{пр.из}} = 3,14 \cdot 0,235^2 \cdot 10^{-6} / 4 = 0,0434 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
35	Площадь, занимаемая изолированным проводом		$S_{\text{пп}} = 0,0434 \cdot 10^{-6} \cdot 336 = 14,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
36	Диаметр вала	Разд.3, п.19	$d_B = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
37	Принимаемый паз якоря овальной формы	Рис.2	
38	Высота сердечника якоря при индукции 1,6 Тл	(3.27)	$h_a = \frac{0,65 \cdot 0,0628 \cdot 0,45}{2 \cdot 0,95 \cdot 1,6} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

39	Высота паза	(3.26)	$h_{\text{п}} = (40 - 2 \cdot 0,45 - 6 - 2 \cdot 6) \cdot 10^{-3} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
40	Размеры щели паза	Разд.3, п.19	$h_{\text{щ}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b_{\text{щ}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
41	Ширина зубца при индукции $B_z = 1,8 \text{ Тл}$	(3.21), (3.25)	$b_z = 7,854 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 / (0,95 \cdot 1,8) \approx 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
42	Максимальная ширина паза	(3.28)	$b_{\text{п. макс}} = [3,14 \cdot (40 - 2 \cdot 0,5) - 2,1 \cdot 16] / (16 + 3,14) = 4,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
43	Минимальная ширина паза	(3.29)	$b_{\text{п. мин}} = [3,14 \cdot (40 - 2 \cdot 11) - 2,1 \cdot 16] / (16 - 3,14) = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
44	Высота средней части паза	(3.30)	$h_{12} = 11 - 0,5 - 4,64/2 - 1,78/2 = 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
45	Площадь паза в штампе	(3.31)	$S_{\text{п}} = 7,25 \cdot (4,64 + 1,78) / 2 + 3,14 \cdot 4,64^2 / 8 + 3,14 \cdot 1,78^2 / 8 = 32,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
46	Коэффициент заполнения паза	Из (3.17)	$K_{з. \text{п}} = 14,57 / 32,96 = 0,442$
47	Длина проводника обмотки якоря	(3.32)	$l_a = 0,056 + 1,2 \cdot 0,040 = 0,104 \text{ м}$
48	Сопrotивление обмотки при $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$	(3.34), (3.35)	$R_a = \frac{1,28 \cdot 5376 \cdot 0,14}{4 \cdot 57 \cdot 10^6 \cdot 0,0346 \cdot 10^{-6}} = 90,7 \text{ Ом}$
49	Падение напряжения в обмотке якоря	(3.36)	$\Delta U_a = 0,382 \cdot 90,7 = 34,65 \text{ В}$

#### 10.4. Коллектор и щёточный аппарат

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
50	Диаметр коллектора	Разд.4, п.23	$D_{\text{к}} = 0,5 \cdot 0,04 = 0,02 \text{ м}$
51	Шаг коллектора (ориентировоч.)	(4.1)	$t_{\text{к}} = 3,14 \cdot 0,02 / 48 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
52	Толщина межломельной изоляции	Разд.4, п.24	$b_{\text{из}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
53	Толщина стороны профиля	Из (4.2 )	$b_{\text{к. п}} = (1,3 - 0,5) \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
54	Принимаемая толщина		$b_{\text{к. п}} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
55	Коллекторный шаг	(4.2)	$t_{\text{к}} = (1,0 + 0,5) \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
56	Диаметр коллек-	Из (4.1)	$D_{\text{к}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 48 / 3,14 = 22,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



	тора		
57	Скорость коллектора	(4.3)	$V_k = 3,14 \cdot 22,9 \cdot 10^{-3} \cdot 3000/60 = 3,6 \text{ м/с}$
58	Выбираемые электрографитированные щётки ЭГ–14	Прилож., табл. 14	$J_{щ} = 10^5 \text{ А/м}^2, \Delta U_{щ} = 2,5 \text{ В}$
59	Ширина щётки по окружности коллектора	Разд.4, п.25	$b_{щ} \approx 3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$ принимаем $b_{щ} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
60	Площадь щётки	(4.5)	$S_{щ} = 0,382/10^5 = 0,382 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$
61	Длина щётки по оси коллектора		Площадь щётки незначительна, поэтому осевой размер выбираем из номинальных размеров по ГОСТ122321.1-77 $a_{щ} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
62	Активная длина коллектора	Разд.4, п.26	$l_{к.а} = 1,5 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
63	Полная длина коллектора	Разд.4, п.26	$l_k = 12 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 0,26 \cdot 10^{-3} \approx 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

#### 10.5. Проверка коммутации

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
64	Удельная магнитная проводимость паза	(4.7)	$\lambda_p = \left[ 0,6 \cdot \frac{2 \cdot 11}{4,64 + 1,78} + \frac{0,104 - 0,056}{0,056} + 0,92 \cdot \log \left( \frac{3,14 \cdot 7,85}{1,3} \right) \right] \times 10^{-6} =$ $= 4,089 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
65	Длина магнитной силовой линии в межполюсном пространстве	(4.9)	$\delta_o = (0,0628 - 0,0408)/2 = 0,011 \text{ м}$
66	Реактивная ЭДС	(4.6)	$\epsilon_R = 2 \cdot 56 \cdot 4,089 \cdot 10^{-6} \cdot 8175 \cdot 0,056 \cdot 6,28 =$ $= 1,317 \text{ В}$
67	ЭДС реакции якоря	(4.8)	$\epsilon_a = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 56 \cdot 8175 \cdot 0,0628 \cdot 0,056 \cdot 6,28}{0,011}$ $= 1,155 \text{ В}$

68	Результирующая ЭДС коммутируемой секции	Разд.4, п.27	$e_p = 1,317 + 1,155 = 2,472 \text{ В} < 2,5 \text{ В}$ , что допустимо
69	Ширина щётки, приведённая к окружности якоря	(4.11)	$b'_{щ} = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04 / 0,0229 = 1,747 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
70	Шаг коллектора, приведённый к окружности якоря	(4.12)	$t'_k = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04 / 0,0229 = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
71	Ширина зоны коммутации	(4.10)	$b_{ком} = 1,747 \cdot 10^{-3} + [3 +  48/2 - 24  - 1/1] \cdot 2,62 \cdot 10^{-3} = 8,796 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 0,8 \cdot (\tau - b_0) = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

#### 10.6. Расчёт магнитной цепи

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
72	Уточнённое значение воздушного зазора	(1.22)	$\delta = 0,4 \cdot 0,0628 \cdot 8175 / 0,45 = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
73	Длина магнитной линии сердечника якоря	(5.16)	$L_a = 3,14(40 - 2 \cdot 11 - 6) / 2 + 6) \cdot 10^{-3} = 24,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
74	Высота сердечника полюса	Разд.5, п.28	$h_{пл} = 0,3 \cdot 0,04 = 0,012 \text{ м}$
75	Длина магнитной линии в станине	(5.20)	$L_{ст} = 3,14(40 + 2 \cdot 0,45 + 2 \cdot 12) \cdot 10^{-3} / 2 = 0,102 \text{ м}$
76	Коэффициент воздушного зазора	(5.2)	$K_\delta = \frac{7,8 + 10 \cdot 0,45}{7,85 - 1,3 + 10 \cdot 0,45} = 1,117$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
77	МДС воздушного зазора	(5.7)	$AW_\delta = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 1,117}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 360 \text{ А}$
78	Магнитная индукция в зубце якоря	(5.12)	$B_z = \frac{0,45 \cdot 7,85}{0,95 \cdot 2,1} = 1,77 \text{ Тл}$
79	Напряжённость магнитного поля в зубце якоря		По кривой намагничивания электро-технической стали 2012 $H_z = 1340 \text{ А/м}$
80	МДС зубцовой	(5.13)	$AW_z = 2 \cdot 1340 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 29,5 \text{ А}$

	зоны		
81	Магнитная индукция в сердечнике якоря	(5.14)	$B_a = \frac{1,028 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 56 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,61 \text{ Тл}$
82	Напряжённость магнитного поля в сердечнике якоря		По кривой намагничивания электро-технической стали 2012 $H_a = 753 \text{ А/м}$
83	МДС сердечника якоря	(5.15)	$AW_a = 753 \cdot 24,85 \cdot 10^{-3} = 18,7 \text{ А}$
84	Магнитная индукция в полюсе (ориентировоч.)		$B_{пл} = 1,5 \text{ Тл}$
85	Ширина полюса	(5.4)	$b_{пл} = \frac{1,028 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1}{0,95 \cdot 1,5 \cdot 0,056} = 14,17 \cdot 10^{-3} \text{ м},$ принимаем $b_{пл} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
86	Уточнённое значение магнитной индукции в полюсе	(5.17)	$B_{пл} = \frac{1,028 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,056} = 1,42 \text{ Тл}$
87	Напряжённость магнитного поля в полюсе		По кривой намагничивания электро-технической стали 2012 $H_{пл} = 420 \text{ А/м}$
88	МДС полюсов	(5.18)	$AW_{пл} = 2 \cdot 420 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 12,6 \text{ А}$
89	Магнитная индукция в станине (ориентировоч.)		$B_{ст} = 1,4 \text{ Тл}$
90	Высота сердечника станины	(5.6)	$h_{ст} = \frac{1,028 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1}{2 \cdot 0,056 \cdot 1,4 \cdot 0,95} = 7,95 \cdot 10^{-3} \text{ м},$ принимаем $h_{ст} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
91	Уточнённое значение индукции в станине	(5.19)	$B_{ст} = \frac{1,028 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1}{2 \cdot 0,056 \cdot 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} \approx 1,4 \text{ Тл}$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
92	Напряжённость магнитного поля в станине		По кривой намагничивания электро-технической стали 2012 $H_{ст} = 400 \text{ А/м}$
93	МДС станины	(5.21)	$AW_{ст} = 400 \cdot 0,114 = 45,6 \text{ А}$
94	Суммарная МДС машины	(5.23)	$AW_{\Sigma} = 360 + 29,5 + 18,7 + 12,6 + 45,6 = 466,4 \text{ А}$
95	Расчёт кривой холостого хода		Задаваясь значениями ЭДС якоря, рассчитывая соответствующие значения магнитного потока, магнитных

			индукций и напряжённостей магнитного поля в элементах магнитопровода машины, получаем зависимость $E = f(AW_{\Sigma})$ . Расчёт зависимости сводится в таблицу (табл.3)
96	Кривая холостого хода $E = f(AW_{\Sigma})$ .		Строится по данным табл. 3
97	МДС поперечной реакции якоря	(5.28)	По переходной характеристике по описанной выше методике (п.31), $AW_{aq} = \frac{0,37 - 0,12}{6 \cdot (0,37 + 0,12)} \cdot 8175 \cdot 0,0408 = 28,36 \text{ A}$
98	МДС продольной реакции якоря	(5.29)	$AW_{ad} = 2 \cdot 8175 \cdot 0,00015 = 2,45 \text{ A}$
99	Коэффициент, учитывающий переходное сопротивление	(5.31)	$K_K = \frac{1,7 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{4 \cdot 56 \cdot 6,28 \cdot 4,089 \cdot 8175 \cdot 0,056} = 0,1614$
100	Продольная коммутационная МДС	(5.30)	$AW_{ком} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 8175}{1 + 0,1614} \cdot \left( 1 + \frac{0,2 \cdot 3,14 \cdot 0,068}{0,011 \cdot 4,089} \right) = 13,72 \text{ A}$
101	ЭДС генератора	(5.34)	$E = 230 + 29,3 + 2,5 = 261,8 \text{ В}$
102	МДС возбуждения		По кривой холостого хода и найденному значению ЭДС: $E = 261,8 \text{ В}$ $AW_{\Sigma НАГР} = 415 \text{ A}$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
103	Суммарная МДС реакции якоря	(5.26)	$AW_R = 28,36 + 2,45 + 10,46 = 41,27 \text{ A}$
104	Суммарная МДС возбуждения генератора	(5.35)	$AW_{\Sigma НАГР} = 415 + 41,27 = 456,27 \text{ A}$

Таблица 3

Расчёт кривой холостого хода генератора постоянного тока

Величины	ЭДС якоря					
	0,5 E	0,8 E	1,0 E	1,1 E	1,2 E	1,3 E

Магнитный поток $\Phi \cdot 10^{-3}$ , Вб	0,538	0,771	1,028	1,130	1,234	1,336
Магнитная индукция $B_{\delta}$ , Тл	0,235	0,337	0,45	0,494	0,539	0,584
Магнитная индукция $B_z$ , Тл	0,924	1,326	1,77	1,945	2,124	2,300
Магнитная индукция $B_a$ , Тл	0,842	1,207	1,61	1,770	1,930	2,090
Магнитная индукция $B_{пл}$ , Тл	0,741	1,062	1,416	1,557	1,700	1,840
Магнитная индукция $B_c$ , Тл	0,732	1,048	1,398	1,537	1,678	1,817
МДС элементов						
$AW_{\delta}$ , А	180	270	360	396	420	468
$AW_z$ , А	6,42	11,22	30,93	55,22	114,44	316,80
$AW_a$ , А	3,37	6,48	19,58	42,24	89,85	191,35
$AW_{пл}$ , А	3,27	6,19	12,48	20,34	34,50	79,20
$AW_c$ , А	12,20	23,14	45,60	69,30	122,00	264,50
$AW_{\Sigma}$ , А	205,26	317,0	468,60	583,10	780,75	1320

### 10.7. Расчёт обмотки возбуждения

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
105	Ток возбуждения	Разд. 1, п.2	$I_B \approx 10\% I_a = 0,1 \cdot 0,382 = 0,0382$ А
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
106	Число витков обмотки возбуждения на полюс	(6.1)	$W_B = 456,3 / (2 \cdot 0,0382) = 5972,5$ , принимаем $W_B = 5970$
107	Номинальный момент генератора	(6.3)	$M_H = 9,55 \cdot 80 / 3000 = 0,255$ Нм
108	Сечение провода обмотки возбуждения (предварительно)	Табл.4	Плотность тока возбуждения (табл.4) $j_B = 4,5 \cdot 10^6$ А/м <sup>2</sup> ; $q_B = 0,0382 / (4,5 \cdot 10^6) = 0,0085 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> Выбираем провод ПЭТВ-1,

			$d_B = 0,106 \text{ мм}, q_B = 0,00882 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$ $d_{B.из} = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
109	Требуемая площадь для размещения обмотки возбуждения	(6.8)	$S'_B = \frac{5970 \cdot 0,12^2}{0,82} \cdot 10^{-6} = 104,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
110	Фактическая площадь окна	Разд.6, п.37	$S_B = 1,15 \cdot 104,8 \cdot 10^{-6} = 120,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
111	Высота катушки возбуждения		По эскизу магнитной системы $h_{KB} = 0,012 \text{ м}$
112	Ширина стороны катушки	Разд.6, п.37	$b_{KB} = 120,5 \cdot 10^{-6} / 0,012 = 0,01 \text{ м}.$ Катушка полностью размещается в окне между станиной и полюсным наконечником
113	Ширина катушки возбуждения	Разд.6, п.37	$b_B = 0,015 + (0,0408 - 0,015) / 2 = 0,028 \text{ м}$
114	Средняя длина витка катушки возбуждения	По эскизу расположения катушки возбуждения	$l_B = 2(0,056 + 0,028 + 2 \cdot 0,01) = 0,208 \text{ м}$
115	Сопротивление обмотки возбуждения	(6.5)	$R_B = 1,22 \frac{2 \cdot 0,208 \cdot 5970}{57 \cdot 10^6 \cdot 0,0082 \cdot 10^{-6}} = 6027 \text{ Ом}$
116	Реальный ток возбуждения	Разд.6, п.40	$I_B = 230 / 6027 = 0,03816 \text{ А},$ реальная величина тока равна ранее принятой
117	Реальная величина плотности тока в обмотке возбуждения	Из (6.2)	$j_B = \frac{0,03816}{0,00882 \cdot 10^{-6}} = 4,32 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$ что меньше допустимого

#### 10.8. Потери и КПД генератора

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
118	Потери в обмотке якоря	(7.1)	$\Delta P_{Ma} = 0,382^2 \cdot 90,7 = 13,23 \text{ Вт}$
119	Потери в обмотке возбуждения	(7.2)	$\Delta P_B = 0,03816^2 \cdot 6027 = 8,78 \text{ Вт}$
120	Потери в щётках	(7.4)	$\Delta P_{щ} = 2,5 \cdot 0,382 = 0,955 \text{ Вт}$
121	Удельные потери в стали		Для стали 2012 удельные потери $P_{1,0/50} = 2,9 \text{ Вт/кг}$
122	Масса магнитопровода ярма	(7.5)	$G_a = 7800 \cdot 3,14(0,04 - 2 \cdot 0,011)^2 \cdot 0,056 / 4 =$ $= 0,111 \text{ кг}$

	якоря		
123	Потери в стали ярма якоря	(7.7)	$\Delta P_{ст.а} = 2,3 \cdot 2,9 \cdot 1,61^2 \cdot 0,111 = 1,92 \text{ Вт}$
124	Масса зубцов якоря	(7.6)	$G_z = 7800 \cdot 16 \cdot 0,011 \cdot 0,0021 \cdot 0,056 = 0,161 \text{ кг}$
125	Потери в стали зубцов	(7.8)	$\Delta P_{ст.з} = 2,3 \cdot 2,9 \cdot 1,77^2 \cdot 0,161 = 3,364 \text{ Вт}$
126	Потери в стали	(7.9)	$\Delta P_{ст} = 1,92 + 3,36 = 5,28 \text{ Вт}$
127	Потери от трения щёток	(7.10)	$\Delta P_{щ.тр} = 2 \cdot 0,25 \cdot 4,0 \cdot 10^4 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 3,6 = 2,88 \text{ Вт}$
128	Масса якоря с коллектором	(7.12)	$G_{а.к} = 3,14(7800 \cdot 0,04^2 \cdot 0,056 + 8900 \cdot 0,0229^2 \cdot 0,014) / 4 = 0,6 \text{ кг}$
129	Потери на трение в подшипниках	(7.11)	$\Delta P_{п.тр} = 3,0 \cdot 0,6 \cdot 3000 \cdot 10^{-3} = 5,4 \text{ Вт}$
130	Потери на трение о воздух	(7.13)	$\Delta P_{в.тр} = 2 \cdot 0,04^3 \cdot 3000^3 \cdot 0,056 \cdot 10^{-6} = 0,193 \text{ Вт}$
131	Полные механические потери	(7.15)	$\Delta P_{мех} = 2,88 + 5,4 + 0,193 = 8,47 \text{ Вт}$
132	Полные потери генератора	(7.16)	$\Delta P_{\Sigma} = 1,15(13,23 + 8,78 + 0,955 + 5,28 + 8,47) = 42,2 \text{ Вт}$
133	Ток генератора	Разд.7, п.46	$I = 0,382 - 0,0382 = 0,344 \text{ А}$
134	КПД генератора	(7.18)	$\eta_H = \frac{230 \cdot 0,344}{230 \cdot 0,344 + 42,2} = 0,652$

### 10.9. Тепловой расчёт

№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
135	Результирующий коэффициент теплоотдачи наружной поверхности якоря	(8.2)	$\alpha_a = 18(1 + 0,1 \cdot 6,283) = 30,3 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$
136	Коэффициент увеличения теплового сопротивления проводника	(8.5)	$K_c = 1 + 4 \left( \frac{0,21}{0,235} - 0,4 \right) = 2,97$
137	Число проводников по средней ширине паза якоря		$m_a = \frac{4,6 + 1,78}{2 \cdot 0,235} = 13,65$ , принимаем $m_a = 14$

138	Эквивалентная междувитковая изоляция	(8.4)	$\beta_2 = \frac{14 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 2,974} = 0,276 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
139	Общая толщина изоляции от меди до стенки паза	(8.3)	$\beta = (0,2 + 0,276) \cdot 10^{-3} = 0,476 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
140	Коэффициент теплопроводности междувитковой и пазовой изоляции	Разд.8, п.49	$\lambda' = 0,125 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
141	Периметр паза		$\Pi = 2 \cdot 0,011 + 0,00464 + 0,00178 = 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
142	Удельные потери в меди якоря	(8.6)	$W_{м.а} = \frac{0,382^2 \cdot 90,7}{16 \cdot 0,104} = 7,95 \text{ Вт}/\text{м}$
143	Удельные потери в стали якоря	(8.7)	$W_{ст.а} = \frac{5,28}{16 \cdot 0,056} = 5,89 \text{ Вт}/\text{м}$
144	Удельные потери трения о воздух	(8.8)	$W_{тр.в} = \frac{0,193}{16 \cdot 0,056} = 0,215 \text{ Вт}/\text{м}$
145	Ширина вершины зубца якоря	(3.22)	$b_{за} = \frac{3,14 \cdot 0,04}{16} - 1 \cdot 10^{-3} = 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
146	Среднее превышение температуры обмотки якоря	(8.1)	$K_a = 1 + 30,3 \cdot 6,85 \cdot 10^{-3} \frac{0,476}{0,125 \cdot 28,4} = 1,0278;$ $\Theta_a = \frac{1,0278 \cdot 7,95 + 5,89 + 0,215}{30,3 \cdot 6,85 \cdot 10^{-3}} = 68,8^{\circ} \text{С}$
147	Коэффициент теплоотдачи коллектора	Разд. 8, п.50	$\alpha_k = 50 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$
148	Полные потери на коллекторе	(8.9)	$P_k = 0,955 + 2,88 = 3,835 \text{ Вт}$
149	Поверхность охлаждения коллектора	(8.10)	$S_k = 3,14 \cdot 0,0299 \cdot 0,014 = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
№ п/п	Рассчитываемая величина	Используемая информация	Результаты расчёта
150	Превышение температуры коллектора	(8.11)	$\Theta_k = \frac{3,835}{50(1+0,14,72) \cdot 1,32 \cdot 10^{-3}} = 39,5^{\circ} \text{С}$
151	Коэффициент теплоотдачи катушки возбуждения	Разд.8, п.51	$\alpha'_o = 28 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$
152	Потери в одной катушке возбуж-	(8.12)	$W_{м.в} = 8,78/2 = 4,39 \text{ Вт}$



	дения		
153	Поверхность охлаждения катушки возбуждения	(8.14)	$S_B = (0,0408 + 0,015 + 2 \cdot 0,015 + 8 \cdot 0,01) \cdot 0,012 + (0,0408 + 0,015 + 4 \cdot 0,010) \cdot 0,012 = 0,00314 \text{ м}^2$
154	Превышение температуры обмотки возбуждения	(8.15)	$\Theta_B = \frac{4,39}{28 \cdot 0,00314} = 49,9 \text{ } ^\circ\text{C}$
155			Температуры якоря, коллектора и обмотки возбуждения не превышают допустимой для выбранного класса изоляции, равной 90° С

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности. М.: Высшая школа, 1967.
2. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин М.: Энергия, 1969.
3. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1980.
4. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко; Под ред. О.Г. Гольдберга. М.: Высшая школа, 1984.
5. Никулин Н.В. Справочник по электротехническим материалам и изделиям. Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1979.
6. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1991.
7. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. М.: Металлургия, 1989.
8. Справочник по электротехническим материалам. Т.3. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1988.
10. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Номинальные диаметры и длины рядов  
R 5а, R 10а, R 20а, R 40а

Ряд R 5а	Ряд R 10а	Ряд R 20а	Ряд R 40а
1,0	1,0	1,0	1,00
			1,05
		1,1	1,10
			1,15

	1,2	1,2	1,20	
			1,30	
		1,4	1,40	
			1,50	
1,6	1,6	1,6	1,60	
			1,70	
		1,8	1,80	
			1,90	
	2,0	2,0	2,00	
			2,10	
		2,2	2,20	
			2,40	
2,5	2,5	2,5	2,50	
			2,60	
		2,8	2,80	
			3,00	
	3,2	3,2	3,20	
			3,40	
		3,6	3,60	
			3,80	
	4,0	4,0	4,0	4,00
				4,20
4,5			4,50	
			4,80	
5,0		5,0	5,00	
			5,20	
		5,5	5,50	
			5,80	
6,0	6,0	6,0		
		7,0		
		7,5		
	8,0	8,0	8,0	
			8,5	
		9,0		
		9,5		

Продолжение табл.1

Ряд R 5а	Ряд R 10а	Ряд R 20а	Ряд R 40а
10,0	10,0	10,0	10,0
			10,5
12,0	12,0	11,0	11,0
			11,5
		12,0	12,0
			13,0

		14,0	14,0 15,0
16,0	16,0	16,0	16,0 17,0
		18,0	18,0 19,0
		20,0	20,0 21,0
	20,0	22,0	22,0 24,0
		25,0	25,0 26,0
		28,0	28,0 30,0
32,0	32,0	32,0	32,0 34,0
		36,0	36,0 38,0
	40,0	40,0	40,0 42,0
		45,0	45,0 48,0
50,0	50,0	50,0	50,0 52,0
		55,0	55,0 58,0
	60,0	60,0	60,0 65,0
		70,0	70,0 75,0
80,0	80,0	80,0	80,0 85,0
		90,0	90,0 95,0

Окончание табл. 1

Ряд R 5	Ряд R 10	Ряд R 20	Ряд R 40
100,0	100,0	100,0	100,0 105,0
		110,0	110,0 115,0
		120,0	120,0 130,0
	120,0	120,0	120,0 130,0

		140,0	140,0
			160,0

Таблица 2

Характеристики обмоточных проводов

Марка провода	Характеристика марки провода	Диаметр, мм	Предельн. температура, °С	Класс нагревостойкости	Марка изоляции
ПЭВ –1, ГОСТ 7262–78	С изоляцией уменьшенной толщины	0,02–2,5	105	А	Лак ВЛ–931 на поливинилацеталевой основе
ПЭВ –2, ГОСТ 7262–78	С изоляцией нормальной толщины	0,05–2,5	105	А	То же
ПЭТВ–1, ТУ 16–705.110–79	Нагревостойкий, покрытый слоем высокопрочной эмали уменьшенной толщины изоляции	0,05–1,6	130	В	Полиэфирные лаки марок ПЭ–943, ПЭ–939
ПЭТВ–р, ТУ 16 – 705.110–79	Нагревостойкий, покрытый слоем высокопрочной эмали	0,02–0,2	130	В	То же
ПЭТр–15578, ТУ 16–705.048–	Теплостойкий, релейный, уменьшенной толщины изоляции	0,02–0,2	155	Ф	Лак полиэфиримидный марки ПЭ–955
ПЭТВ–2, ОСТ 160.505.001–80	Нагревостойкий, покрытый слоем высокопрочной эмали, нормальной толщины	0,06–2,5	130	В	То же

Окончание табл. 2

Марка провода	Характеристика марки провода	Диаметр, мм	Предельн. температура, °С	Класс нагревостойкости	Марка изоляции
ПЭТ–имид, ТУ 16 – 505.489–78	Высоконагревостойкий, покрытый полиимидной изоляцией	0,03–2,5	220	С	Полиимидные лаки марок АД–9103, АД–9103ПС

Таблица 3

Номинальные диаметры и сечения медных  
эмалированных проводов

Диаметр неизолированного провода, мм	Диаметр изолированного провода, мм	Сечение неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
0,20	0,23	0,0314
0,224	0,259	0,0394
0,25	0,285	0,0491
0,28	0,315	0,0616
0,315	0,35	0,0779
0,335	0,379	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,45	0,49	0,159
0,50	0,545	0,1963
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,9	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767

Окончание табл. 3

Диаметр неизолированного провода, мм	Диаметр изолированного провода, мм	Сечение неизолированного провода, мм <sup>2</sup>
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,27
1,80	1,895	2,54
1,90	1,995	2,83
2,00	2,095	3,14

2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,50	2,60	4,91

Таблица 4

Коэффициенты заполнения пакета  
магнитопровода сталью в зависимости от способа изоляции листов

Толщина листа, мм	Способ изоляции	
	Оксидирование, окалина	Лакирование
0,5	0,97	0,95
0,35	0,95	0,93

Таблица 5

Характеристики литой стали для монолитных станин  
машин постоянного тока (Ст. 3)

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
$H, A/m \cdot 10^2$										
0,0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,60	1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,56	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,08	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79

Продолжение табл.5

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
$H, A/m \cdot 10^2$										
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72

0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,60	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,78	9,53	9,69	9,85	10,00	10,2	10,4	10,60	10,70
1,1	10,9	11,1	11,30	11,50	11,70	11,90	12,1	12,3	12,50	12,70
1,2	12,9	13,1	13,40	13,70	14,00	14,30	14,6	14,9	15,20	15,50
1,3	15,9	16,0	16,70	17,20	17,60	18,10	18,6	19,2	19,70	20,00
1,4	20,9	21,6	22,30	23,00	23,70	24,40	25,3	6,20	27,1	28,00
1,5	28,9	29,9	31,0	32,10	33,20	34,30	35,6	37,0	38,30	39,60
1,6	41,0	42,5	44,00	45,50	47,00	48,50	50,0	51,5	53,00	55,60

Таблица 6

Характеристики чугуна для монолитных станин машин  
постоянного тока

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,0	0	1,00	2,00	2,80	3,60	4,20	4,60	5,00	5,40	5,70
0,1	6,00	6,30	6,60	6,90	7,20	7,50	7,80	8,10	8,40	8,70
0,2	9,00	9,30	9,60	9,90	10,20	10,50	10,80	11,10	11,40	11,80
0,3	12,2	12,6	13,00	13,4	13,80	14,30	14,70	15,10	15,60	16,00

Продолжение табл.6

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,4	16,4	16,9	17,50	18,0	18,60	19,10	19,70	20,20	20,80	21,40
0,5	22,0	22,6	23,50	24,0	24,70	25,50	26,20	27,00	27,80	28,60
0,6	29,4	30,3	31,30	32,2	33,20	34,20	35,20	36,20	37,20	38,20

0,7	39,2	40,5	41,80	43,2	44,60	46,00	47,50	49,10	50,70	52,30
0,8	54,0	55,7	57,50	59,3	61,10	63,00	65,00	67,10	69,30	71,40
0,9	73,6	75,0	77,80	80,0	83,00	86,00	89,00	92,00	95,00	98,00
1,0	101	105	108,0	112	116	120	124	128	132	136
1,1	140	144	149	154	159	165	170	175	181	186
1,2	192	198	204	211	218	225	232	240	247	255
1,3	262	270	278	286	294	303	312	321	330	339
1,4	348	359	370	382	392	409	423	436	450	464
1,5	478	494	510	526	545	562	580	600	617	632

Таблица 7

Характеристика намагничивания  
горячекатаных слаболегированных электротехнических  
сталей 1211, 1212, 1311

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,24	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91

Продолжение табл.7

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
1,0	5,02	5,15	5,30	5,45	5,55	5,70	5,85	6,05	6,20	6,35
1,1	6,5	6,65	6,80	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	9,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,70	11,0



1,3	11,4	11,81	12,10	12,60	13,0	13,4	13,8	14,2	14,8	15,3
1,4	15,8	16,45	17,1	17,8	18,7	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,1	26,4	27,87	29,5	31,1	32,8	34,57	36,59	38,8	41,2
1,6	43,7	46,32	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,83	73,7
1,7	77,8	82,2	86,3	90,7	96,3	101,0	106,0	111,0	116,0	122,0
1,8	128,0	134,0	142,0	146,0	152,0	159,0	166,0	173,0	180,0	188,0
1,9	197,0	206,0	216,0	226,0	236,0	246,0	256,0	268,0	282,0	296,0
2,0	310,0	325,0	343,0	365,0	390,0	420,0	465,0	495,0	545,0	595,0
2,1	655,0	725,0	800,0	880,0	960,0	1040	1120	1200	1280	1300
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

Таблица 8

Характеристика намагничивания  
высоколегированных горячекатаных электротехнических  
сталей 1511, 1512, 1513

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,4	0,96	0,97	0,98	0,99	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11
0,5	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32	1,36	1,40	1,44

Продолжение табл.8

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Н, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,6	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64	1,68	1,72	1,77	1,82	1,87
0,7	1,92	1,97	2,02	2,08	2,14	2,20	2,26	2,33	2,40	2,47

0,8	2,54	2,61	2,68	2,75	2,82	2,89	2,96	3,03	3,1	3,17
0,9	3,25	3,33	3,41	3,49	3,58	3,67	3,76	3,85	3,94	4,04
1,0	4,14	4,24	4,35	4,46	4,58	4,70	4,83	4,96	5,10	5,24
1,1	5,38	5,53	5,69	5,86	6,04	6,23	6,43	6,64	6,85	7,07
1,2	7,3	7,54	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,4	9,8	10,3
1,3	10,8	11,3	12,0	12,7	13,4	14,1	14,9	15,9	16,0	17,2
1,4	19,4	20,6	22,0	23,4	25,0	27,0	29,2	31,4	33,7	36,0
1,5	38,5	40,6	42,9	45,2	47,6	50,0	53,0	56,5	60,0	63,5
1,6	67,0	71,0	76,0	81,0	86,5	93,0	100,0	107,0	114,0	122,0
1,7	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0	190,0	200,0	210,0	220,0
1,8	230,0	240,0	250,0	260,0	270,0	280,0	290,0	300,0	312,0	325,0
1,9	340,0	355,0	370,0	385,0	405,0	425,0	450,0	510,0	570,0	630,0
2,0	700,0	770,0	845,0	920,0	1000	1080	1160	1240	1380	1400
2,1	1480	1560	1640	1720	1800	1880	1960	2040	2120	2200
2,2	2280	2360	2440	2520	2600	2680	2760	2840	2920	3000

Таблица 9

Характеристика намагничивания  
холоднокатаных электротехнических сталей 2011, 2013

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, А/м · 10 <sup>2</sup>										

0,6	0,70	0,705	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,80
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,00	11,30	12,40	13,50	14,60	15,80
1,6	17,00	18,60	20,20	21,80	23,40	25,00	27,00	28,00	30,00	32,00
1,7	34,00	37,00	40,00	43,00	47,00	50,00	54,00	58,00	62,00	66,00
1,8	70,00	75,00	80,00	85,00	92,00	100,0	106,0	112,0	118,0	124,0
1,9	130,0	136,0	142,0	148,0	156,0	165,0	173,0	181,0	189,0	198,0
2,0	207,0	226,0	244,0	263,0	281,0	300,0	360,0	420,0	480,0	540,0
2,1	600,0	670,0	740,0	810,0	880,0	950,0	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Таблица 10

Характеристика намагничивания  
холоднокатанных электротехнических сталей 2311, 2312

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, А/м · 10 <sup>2</sup>										
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95

0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100,0	106,0	111,0	117,0	122,0	128,0
1,8	134,0	140,0	146,0	152,0	158,0	164,0	170,0	176,0	182,0	188,0
1,9	194,0	200,0	218,0	237,0	257,0	278,0	300,0	322,0	344,0	366,0
2,0	388,0	410,0	434,0	460,0	480,0	521,0	577,0	597,0	641,0	689,0
2,1	740,0	800,0	860,0	920,0	980,0	1050	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	280	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

Таблица 11

Характеристика намагничивания  
холоднокатаных электротехнических сталей 2411, 2412, 2413

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, А/м · 10 <sup>2</sup>										

0,4	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
0,6	0,90	0,92	0,92	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,25	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,87	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,86	5,00	5,40
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	35,4	38,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100,0	105,0	110,0	115,0	120,0	125,0	131,0	137,0	143,0	149,0
1,8	156,0	162,0	168,0	175,0	183,0	191,0	200,0	209,0	219,0	229,0
1,9	239,0	250,0	262,0	274,0	287,0	300,0	320,0	360,0	420,0	500,0
2,0	590,0	680,0	770,0	860,0	950,0	1040	1130	1220	1310	1400
2,1	1490	1580	1670	1760	1850	1940	2030	2120	2210	2300
2,2	2390	2480	2580	2660	2750	2840	2930	3020	3110	3200

Таблица 12

Характеристика намагничивания  
холоднокатаной текстурованной электротехнической стали 3411, 3412

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, A/m · 10 <sup>2</sup>										
1,0	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,90	2,00	2,00	2,10	2,10

1,1	2,20	2,20	2,30	2,35	2,40	2,40	2,50	2,60	2,60	2,70
1,2	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60
1,3	3,70	3,80	4,00	4,10	4,20	4,30	4,50	4,60	4,70	4,80
1,4	5,00	5,20	5,40	5,60	5,80	6,00	6,20	6,40	6,60	6,80
1,5	7,00	7,30	7,60	7,90	8,20	8,50	8,80	9,10	9,40	9,70
1,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,7	20,0	21,0	22,0	23,0	34,0	25,0	28,0	31,0	34,0	37,0
1,8	40,0	43,0	46,0	50,0	54,0	59,0	65,0	71,0	78,0	85,0
1,9	92,0	100,0	112,0	130,0	155,0	190,0	225,0	260,0	300,0	350,0
2,0	400,0	450,0	500,0	550,0	600,0	660,0	730,0	815,0	890,0	980,0

Таблица 13

Характеристика намагничивания холоднокатаных  
текстурированных электротехнических сталей 3413, 3414

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, A/m · 10 <sup>2</sup>										
0,6	0,81	0,83	0,85	0,97	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99
0,7	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,8	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4	1,42	1,44	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,76	1,79
1,0	1,82	1,85	1,88	1,92	1,95	1,98	2,01	2,04	2,07	2,10

Окончание табл. 13

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
H, A/m · 10 <sup>2</sup>										
1,1	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2,34	2,37	2,40
1,2	2,43	2,46	2,49	2,52	2,55	2,58	2,61	2,64	2,67	2,71

1,3	2,75	2,78	2,83	2,87	2,91	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15
1,4	3,2	3,26	3,32	3,38	3,44	3,50	3,58	3,66	3,74	3,82
1,5	3,9	4,02	4,14	4,26	4,38	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,6	5,20	5,44	5,66	5,88	6,10	6,32	6,65	6,98	7,32	7,66
1,7	8,00	8,40	8,90	9,40	9,90	10,40	11,32	12,24	13,16	14,08
1,8	15,0	15,42	17,0	19,22	21,44	23,66	25,88	28,20	30,8	34,5
1,9	38,25	42,0	46,0	52,0	58,0	70,0	82,0	94,0	109,0	134,0
2,0	160,0	200,0	250,0	300,0	–	–	–	–	–	–

Таблица 14

Номинальные размеры щёток, мм

Обозначение типов щёток	Ширина по окружности коллектора $b_{щ}$	Длина по оси коллектора $a_{щ}$	Высота щётки $h_{щ}$
Ф0	1,0	1,6	6,3
	1,6	2,0	5,0
			6,3
			8,0
	2,0	2,5	6,3
2,5	3,2	10,0	
		4,0	
Ф0	3,2	3,2	6,3
			10,0
	2,5	4,0	8,0
			10,0
			12,5
3,2	4,0	8,0	
		10,0	
		12,5	

Окончание табл. 14

Обозначение типов щёток	Ширина по окружности коллектора $b_{щ}$	Длина по оси коллектора $a_{щ}$	Высота щётки $h_{щ}$
Ф0	3,2	5,0	10,0
			12,5
			16,0

		6,3	10,0 12,5 16,0
Ф8-А1	4,0	5,0 6,3 8,0	8,0 12,5 16,0
	5,0	6,3 10,0 12,5	12,5 16,0 20,0
	6,3	8,0 10,0	20,0 25,0
	8,0	10,0 12,5	25,0 25,0

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ МАШИНЫ.....	4
2. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ.....	8
3. РАЗМЕРЫ ЗУБЦОВ, ПАЗОВ И ПРОВОДНИКОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ.....	10



4. КОЛЛЕКТОР И ЩЁТОЧНЫЙ АППАРАТ.....	15
5. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	19
6. РАСЧЁТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	26
7. ПОТЕРИ И КПД МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	28
8. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	33
9. РАСЧЁТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	35
10. ПРИМЕР РАСЧЁТА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	57