

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**В. В. Логвин**

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**ПРАКТИКУМ**

**для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2010**

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73  
Л69

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 09.03.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*О. Г. Широков*

**Логвин, В. В.**  
Л69 Специальные электрические машины : практикум для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения / В. В. Логвин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 31 с.– Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Представлены задания и примеры решения по исследованию процессов в тахогенераторах постоянного тока и проектированию асинхронных исполнительных двигателей.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2010

## ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

Тахогенераторами называют электрические микромашины, работающие в генераторном режиме и служащие для преобразования скорости вращения в пропорциональный электрический сигнал. При этом закон преобразования определяется выходной характеристикой тахогенератора, т.е. зависимостью между входной величиной – скоростью вращения вала  $\omega$  и выходной – напряжением  $U_{\text{вых}}$  в выходной обмотке.

Уравнение выходной характеристики идеального тахогенератора в общем случае

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{yc}} \omega = k_{\text{yc}} \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{yc}}(s)$  – статический коэффициент усиления (крутизна выходной характеристики [ $\text{В}/\text{об}/\text{мин}$ ]);

$\theta$  – угол поворота ротора тахогенератора.

Тахогенераторы постоянного тока по принципу действия и конструктивному оформлению представляют собой электрические коллекторные машины постоянного тока с независимым электромагнитным (рис. 1, а) или магнитоэлектрическим возбуждением.

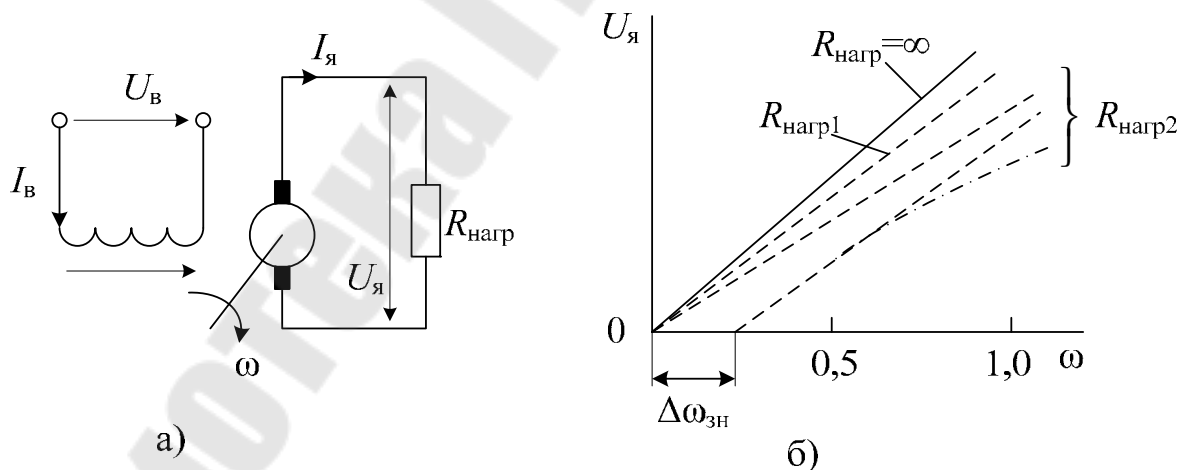


Рис. 1. Схема и выходные характеристики тахогенератора постоянного тока

Выходной характеристикой тахогенератора постоянного тока является зависимость величины напряжения на зажимах якоря  $U$  от скорости вращения якоря  $\omega$  при постоянном магнитном потоке возбуждения  $\Phi$  и постоянном сопротивлении нагрузки  $R_{\text{нагр}}$ . Из теории

электрических машин известно, что величина ЭДС якоря  $E_{\text{я}}$  прямо пропорциональна магнитному потоку возбуждения и скорости вращения якоря. Значит, при постоянном магнитном потоке можно записать:

$$E_{\text{я}} = k_E \omega = k_E \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

где  $k_E$  – постоянная машины, равная  $k\Phi$ ;

$k$  – конструктивный коэффициент;

$\theta$  – угол поворота якоря тахогенератора;

Выражение (2) – это уравнение выходной характеристики тахогенератора постоянного тока при холостом ходе, т. е. при разомкнутой цепи якоря. Данная линейная зависимость показана на рис. 1, б (для  $R_{\text{нагр}} = \infty$ ). Значения скорости  $\omega$  взяты в относительных единицах.

При подключении обмотки якоря к зажимам прибора или устройства с конечной величиной входного сопротивления и при постоянстве магнитного потока возбуждения выходное напряжение будет меньше ЭДС якоря на величину падения напряжения в цепи якоря:

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{ц.я}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{я}}$  – ток якоря;

$R_{\text{ц.я}}$  – сопротивление цепи якоря, равное сумме сопротивлений обмотки  $R_{\text{я}}$  и переходного щеточного контакта.

Поскольку величину тока определяют по закону Ома с помощью соотношения

$$I_{\text{я}} = U_{\text{я}} / R_{\text{нагр}}, \quad (4)$$

то

$$U_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}}}{1 + \frac{R_{\text{ц.я}}}{R_{\text{нагр}}}} = \frac{k_E \omega}{1 + \frac{R_{\text{ц.я}}}{R_{\text{нагр}}}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) свидетельствует о линейности выходной характеристики тахогенератора постоянного тока в случае постоянства магнитного потока возбуждения и сопротивления переходного щеточного контакта.

На рис. 1, б представлены выходные характеристики, соответствующие уравнению (5) для двух конечных значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{нагр}1}$  и  $R_{\text{нагр}2}$ ; причем  $R_{\text{нагр}1} > R_{\text{нагр}2}$ .

Однако выходная характеристика реального тахогенератора может отклоняться от линейной зависимости (5), т. е. появляется амплитудная скоростная погрешность. Это объясняется двумя факторами.

Во-первых, при нагрузке тахогенератора возникает реакция якоря, ослабляющая поток возбуждения. Результирующий поток при нагрузке можно представить как

$$\Phi_{\text{нагр}} = \Phi - \Delta\Phi_{\text{р}}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – поток при холостом ходе;

$\Delta\Phi$  – изменение потока, вызванное размагничивающим действием реакции якоря и пропорциональное току якоря.

Следовательно, ЭДС якоря при нагрузке  $E_{\text{я.нагр}}$  не является постоянной величиной для данной скорости вращения якоря, а зависит от величины нагрузки и определяется выражением:

$$E_{\text{я.нагр}} = k\alpha \Phi_{\text{нагр}}. \quad (7)$$

Во-вторых, при работе тахогенератора на нагрузку постоянным следует считать не сопротивление переходного контакта, а падение напряжения  $U_{\text{щ}}$  в нем. Это соответствует характеру зависимости сопротивления графита, из которого выполняют щеточные контакты, от плотности тока в нем. Тогда, очевидно, напряжение на зажимах якоря тахогенератора при нагрузке будет определяться уравнением

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я.нагр}} - U_{\text{щ}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}. \quad (8)$$

Преобразуем это выражение с учетом (4), (6) и (7):

$$U_{\text{я}} = \frac{k_E \alpha - U_{\text{щ}}}{1 + \frac{k k_{\text{р}} \omega + R_{\text{я}}}{R_{\text{нагр}}}}, \quad (9)$$

где  $k_{\text{р}} = \Delta\Phi_{\text{р}}/I_{\text{я}}$  – коэффициент пропорциональности между током якоря и потоком  $\Delta\Phi_{\text{р}}$ .

Выражение (9) является уравнением выходной характеристики тахогенератора постоянного тока с учетом размагничивающего действия реакции якоря и постоянства падения напряжения в щеточном контакте.

## ЗАДАНИЕ 1

1. Выбрать тахогенератор постоянного тока (таблица 1) для двигателя с номинальной частотой вращения  $n_{дв}$ .

2. По номинальным данным выбранного тахогенератора построить выходные характеристики  $U_{я}=f(\omega)$  для трех случаев:

2.1.– сопротивление нагрузки  $R_{нагр}=\infty$  (размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения в щеточном контакте пренебречь);

2.2.– сопротивление нагрузки задано (таблица 2) (размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения в щеточном контакте пренебречь);

2.3.– присутствует падение напряжения в щётках  $U_{щ}=kE_{яном}$  и размагничивающее действие реакции якоря  $KK_p$

3. Определить изменение выходного напряжения при номинальной частоте вращения двигателя, если отклонение температуры от номинальной в помещении составило  $\Delta t$  (таблица 2). Пояснить, почему произошло изменение (увеличение, уменьшение) выходного напряжения. Номинальную температуру в производственном помещении принять 20 °С.

Таблица 1

**Технические данные тахогенераторов**

Тип ТГ	$n_{ном}$ , об/мин	$k_{уэ}$ мВ/(об/мин)	$R_{я}$ , кОм	$\Delta u/T$ , %/°С
ТГП-1	7000	5	3	0,1
ТГП-1А	3000	4	1,2	0,12
ТГП-3	9000	4	10	0,04
ТГП-3А	3000	4	3	0,04
ТГП-3Б	3500	4	10	0,04
ТГП-3Д	3000	4	10	0,04
ТГП-5	6000	4	10	0,04
1,6ТГП-2	3000	2	10	0,04
2,5ТГП-6	6000	6	10	0,02
2,5ТГП-10	3000	10	6	0,04
ТП20-6-0,5	3000	6	10	0,04
ТП32-25-0,1	3000	25	25	0,02
ТП32-16-2,5	3000	16	2	0,02
ТП50-100-1	1500	100	10	0,1

Таблица 2

Вариант	$n_{дв}, об/мин$	$R_{нагр}, Ом$	$\Delta t, ^\circ C$	$\kappa$	$K \cdot K_p$
1	900	500	-30	0,01	0,1
2	1200	1500	-20	0,02	0,2
3	1800	3000	-10	0,03	0,3
4	2100	10000	10	0,04	0,4
5	2900	2000	20	0,05	0,5
6	3400	15000	30	0,06	0,6
7	4000	100000	40	0,07	0,7
8	5000	1000	-40	0,08	0,8
9	6500	4000	-30	0,09	0,9
10	7600	5000	-20	0,1	0,1
11	2900	1500	10	0,01	0,2
12	1800	10000	20	0,02	0,3
13	4000	15000	30	0,03	0,4
14	900	1000	40	0,04	0,5
15	2100	5000	-40	0,05	0,6
16	5000	4000	-30	0,06	0,7
17	7600	10000	-20	0,07	0,8
18	1800	2000	-10	0,08	0,9
19	6500	3000	10	0,09	0,1
20	3400	500	-0	0,1	0,2
21	2100	1000	20	0,01	0,3
22	1200	2000	-10	0,02	0,4
23	900	1500	-20	0,03	0,5
24	5000	5000	30	0,04	0,6
25	6500	10000	-40	0,05	0,7
26	3400	15000	10	0,06	0,8
27	2100	500	40	0,07	0,9
28	1200	3000	30	0,08	0,1
29	1800	1500	-20	0,09	0,2
30	900	1000	20	0,1	0,3

## БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ УПРАВЛЕНИЯ

Асинхронные исполнительные двигатели, применяемые в устройствах автоматики, служат для преобразования подводимого к ним электрического сигнала в механическое перемещение вала. При заданном тормозном моменте частота вращения двигателя должна строго соответствовать подводимому напряжению и меняться при изменении его величины или фазы. Таким образом, *исполнительные двигатели являются управляемыми двигателями.*

**Электромеханическая постоянная времени.** Одним из основных требований, предъявляемых к исполнительному двигателю, является его быстродействие. Время разгона исполнительного двигателя определяется главным образом электромеханическими процессами, так как из-за значительного активного сопротивления ротора электромагнитные переходные процессы, происходящие в двигателе, очень быстротечны. Обычно о быстродействии двигателя судят по величине его электромеханической постоянной времени  $T_m$ , которая примерно на порядок выше электромагнитной постоянной времени  $T_{эм} = L/R$ , обусловленной индуктивностью двигателя. Значение  $T_m$  определяется из условий разгона ротора двигателя при статическом моменте на валу  $M_{ст} = 0$ . При этом основное уравнение динамики

$$M = M_{ст} + J d\alpha/dt \quad (10)$$

принимает вид

$$M = J d\alpha/dt, \quad (11)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся масс.

Для идеализированного двигателя при линейной механической характеристике

$$M = M_n (1 - \alpha/\alpha_0), \quad (12)$$

где  $M_n$  – пусковой момент;

$\omega_0$  – угловая скорость холостого хода.

Следовательно, с учетом (12) уравнение (11) может быть записано в виде

$$M_n (1 - \alpha/\alpha_0) = J d\alpha/dt, \quad (13)$$



или

$$\frac{d\alpha}{\omega_0 - \omega} = \frac{M_{\text{п}}}{J\omega_0} dt = \frac{1}{T_{\text{м}}} dt, \quad (14)$$

где

$$T_{\text{м}} = J\alpha_0 / M_{\text{п}}. \quad (15)$$

Решая (14), получим уравнение

$$\omega = \omega_0 (1 - e^{-t/T_{\text{м}}}), \quad (16)$$

по которому можно построить кривую разгона двигателя (рис. 2). Из нее видно, что угловая скорость вращения  $\omega$  стремится асимптотически к установившемуся значению  $\omega_0$ ; при  $t = T_{\text{м}}$  угловая скорость  $\omega = \omega_0 (1 - e^{-1}) = 0,633\omega_0$ . Следовательно, постоянную  $T_{\text{м}}$  можно рассматривать как время разгона двигателя до угловой скорости, соответствующей  $0,633\omega_0$ .

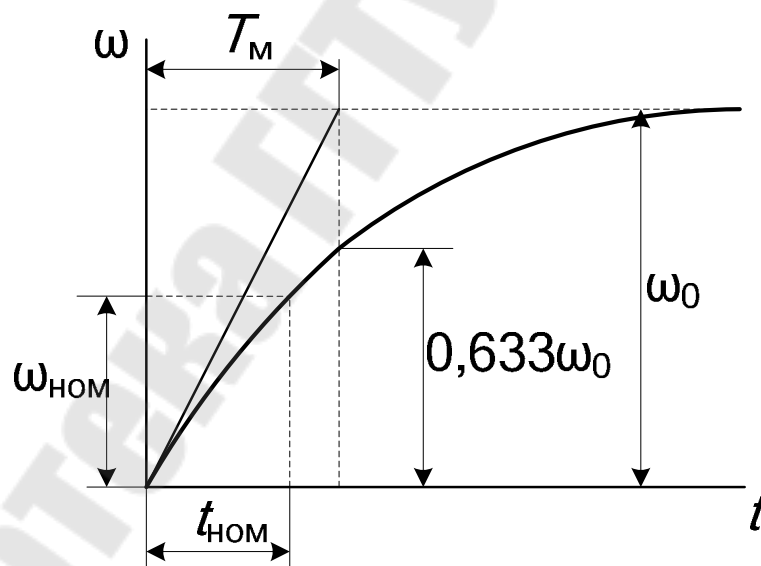


Рис. 2. Кривая разгона исполнительного двигателя

В двигателе с амплитудным управлением  $\omega_0 = v_0 \omega_1 = 2\alpha_3 \omega_1 / (1 + \alpha_3^2)$ , так как  $v = n/n_1 = \alpha/\alpha_1$ , где  $\omega_1$  – синхронная угловая скорость, соответствующая круговому вращающему полю и пусковому моменту  $M_{\text{п}} = \alpha_3 M_{\text{к}}$ , поэтому

$$T_m = 2\omega_1 J / [M_k (1 + \alpha_3^2)]. \quad (17)$$

Из формулы (17) следует, что при амплитудном управлении постоянная времени  $T_m$  растет с уменьшением эффективного коэффициента сигнала  $\alpha_3$ , так как снижается величина пускового момента.

При фазовом управлении  $\alpha_0 = \alpha_3 \alpha_1$  и  $M_{\Pi} = \alpha_3 M_k$ , поэтому

$$T_m = J \alpha_1 / M_k. \quad (18)$$

Следовательно, при фазовом управлении постоянная времени  $T_m$  не зависит от коэффициента сигнала  $\alpha_3$ . Это объясняется тем, что при фазовом управлении механические характеристики параллельны – при уменьшении коэффициента сигнала прямо пропорционально снижаются момент при пуске и угловая скорость вращения при холостом ходе. В результате время разгона не изменяется.

При амплитудном управлении уменьшение коэффициента сигнала  $\alpha_3$  приводит к такому же уменьшению момента, но угловая скорость вращения при холостом ходе снижается в меньшей степени. Так, например, при  $\alpha_3 = 0,5$  пусковой момент в два раза меньше, чем при  $\alpha_3 = 1$ , а угловая скорость вращения при холостом ходе составляет 0,8 от ее значения при  $\alpha_3 = 1$ . Естественно, что время разгона двигателя с уменьшением коэффициента сигнала растет.

Из (17) и (18) следует, что постоянная времени  $T_m$  зависит от отношения  $J/M_k$  и угловой скорости вращения  $\alpha_1 = 2\pi f_1 / p$ . Поэтому  $T_m$  возрастает с увеличением момента инерции ротора  $J$  и частоты  $f_1$  питающей сети и уменьшается при увеличении числа полюсов  $p$ . Двигатели, рассчитанные на работу при повышенной частоте тока, несмотря на то, что их обычно выполняют многополюсными, имеют большую постоянную времени, чем машины, рассчитанные на работу при частоте питающей сети 50 Гц.

В таблице 3 приведены ориентировочные значения постоянной времени при круговом поле для исполнительных двигателей различной конструкции мощностью 15 – 30 Вт.

Таблица 3

Тип исполнительного двигателя	Постоянная времени $T_m$ , с, при частоте питающей сети, Гц	
	50	400
С полым немагнитным ротором	0,005 – 0,1	0,02 – 0,15
С ротором в виде беличьей клетки:		
обычной конструкции	0,2 – 1,0	0,3 – 1,5
сквозной конструкции	–	0,007 – 0,06
С полым стальным ротором	1,0 – 2,0	1,5 – 3,0

Из таблицы следует, что наибольшим быстродействием обладает двигатель с полым немагнитным ротором. Постоянная времени  $T_m$  двигателя с ротором в виде беличьей клетки также невелика, несмотря на существенное увеличение момента инерции, так как этот двигатель имеет больший вращающий момент на единицу массы, чем двигатель с полым немагнитным ротором (особенно это относится к двигателю сквозной конструкции). В двигателе с полым стальным ротором величина  $T_m$  значительно увеличивается как из-за сравнительно большого момента инерции ротора, так и из-за малого вращающего момента. При мощности от долей ватта до 10 Вт наибольшим быстродействием и лучшими энергетическими показателями обладает двигатель с ротором типа «беличья клетка».

Иногда быстродействие исполнительного двигателя характеризуют временем разгона  $t_{\text{НОМ}}$  до номинальной угловой скорости  $\omega_{\text{НОМ}}$  (см. рис. 2). Номинальным режимом исполнительного двигателя обычно считают режим, соответствующий максимальной механической мощности, которая для идеализированного двигателя имеет место при  $\alpha_{\text{НОМ}} = 0,5\alpha_0$ . Поэтому, положив в (16)  $\alpha = 0,5\alpha_0$  и  $t = t_{\text{НОМ}}$ , получим

$$t_{\text{НОМ}} = T_m \ln 2 = 0,693T_m. \quad (19)$$

## ЗАДАНИЕ 2

1. Определить электромеханическую постоянную времени  $T_M$  и построить кривую разгона исполнительного двигателя на холостом ходе.

2. Построить кривую разгона исполнительного двигателя с рабочим механизмом на валу обладающим моментом инерции  $J_M$ .

3. Рассчитать электромеханические постоянные времени при амплитудном и фазовом управлении и определить время пуска до номинальной угловой скорости  $\omega_{ном}$  без нагрузки на валу для заданных способов управления.

Исходные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Вариант	$M_K,$ Н·м	$n_0,$ об/мин	$J \cdot 10^{-7}$ кг·м <sup>2</sup>	$\alpha,$	$J_M \cdot 10^{-5}$ кг·м <sup>2</sup>
1	0,0055	12500	78	0,9	10
2	0,014	6000	70	0,8	100
3	0,09	2650	166	0,6	200
4	0,054	8800	390	0,5	150
5	0,17	2650	30	0,4	300
6	0,07	8600	24,5	0,3	500
7	0,12	8600	36	0,9	100
8	0,01	8000	24,5	0,8	50
9	0,022	6000	78	0,7	70
10	0,028	10000	166	0,6	250
11	0,014	6000	70	0,5	10
12	0,054	8800	36	0,4	50
13	0,07	8600	30	0,9	70
14	0,01	8000	390	0,8	100
15	0,028	10000	24,5	0,7	150
16	0,0055	12500	166	0,6	200
17	0,09	2650	70	0,5	300
18	0,017	2650	78	0,4	250
19	0,017	8600	390	0,7	500

Окончание табл. 4

Вариант	$M_{кз}$ Н·м	$n_0$ , об/мин	$J \cdot 10^{-7}$ кг·м <sup>2</sup>	$\alpha_3$	$J_m \cdot 10^{-5}$ кг·м <sup>2</sup>
20	0,012	6000	24,5	0,6	100
21	0,022	10000	166	0,9	10
22	0,0055	8000	30	0,5	70
23	0,054	2650	36	0,8	50
24	0,12	6000	166	0,4	250
25	0,028	12500	70	0,5	300
26	0,022	8800	78	0,6	500
27	0,07	6000	166	0,7	250
28	0,09	12500	390	0,9	70
29	0,17	8000	30	0,8	10
30	0,014	8600	24,5	0,5	300

### ЗАДАНИЕ 3

Расчет мощностей, вращающего момента и потерь асинхронного исполнительного двигателя.

1. По исходным данным таблицы 5 рассчитать и построить зависимости электромагнитной мощности от скольжения  $P_3=f(s)$ , электромагнитного момента  $M_3=f(s)$ , полной электромагнитной мощности  $P=f(s)$ .

2. Сделать выводы о возможности самохода при данном способе управления.

Таблица 5

Вариант	Тип двигателя	$U_B, В$	$P_{Rи}, Вт$	$f, Гц$	$2p$	$r_{Sy}, Ом$	$x_{Sy}, Ом$	$x_{my}, Ом$	$r_{Ry}, Ом$	$\xi_m$	$\rho_s$	$\xi_s$	Способ управления	$\alpha_e$	$\beta_e$ , град
1	АДП-262	110	9,5	50	2	44	28	225	392	0,57	0,12	0,07	Амплитудный	0,5	-
2	АДП-362	110	19	50	2	27,5	19	213	236	0,9	0,12	0,07		0,6	-
3	АДП-263А	110	27,8	500	6	34,6	164	342	483	0,71	0,07	0,08		0,7	-
4	АДП-363А	110	46,4	500	6	15,5	121	310	241	1,29	0,06	0,34		0,8	-
5	ДИД-0,1	36	0,1	400	2	361	73	260	346	0,75	1,05	0,29		0,9	-
6	ДИД-0,5У	36	0,4	400	2	133	55	284	396	0,72	0,34	0,14	Амплитудно-фазовый	0,5	25
7	ДИД-0,6ТВ	36	0,6	400	2	134	40	238	200	1,19	0,67	0,2		0,6	40
8	ДИД-1ТВ	36	1	400	2	75,6	38	263	221	1,19	0,34	0,17		0,7	60
9	ДИД-2ТВ	36	2	400	2	37,8	20	204	146	1,4	0,26	0,14		0,8	75
10	ДИД-3ТВ	36	3	400	4	11	14	58	83	0,7	0,13	0,17		0,9	80
11	АДП-262	110	9,5	500	2	44	28	225	392	0,57	0,12	0,07	Амплитудный	0,5	-
12	АДП-362	110	19	500	2	27,5	19	213	236	0,9	0,12	0,07		0,6	-
13	АДП-263А	110	27,8	500	6	34,6	164	342	483	0,71	0,07	0,08		0,7	-
14	АДП-363А	110	46,4	400	6	15,5	121	310	241	1,29	0,06	0,34		0,8	-
15	ДИД-0,1	36	0,1	400	2	361	73	260	346	0,75	1,05	0,29		0,9	-
16	ДИД-0,5У	36	0,4	400	2	133	55	284	396	0,72	0,34	0,14	Амплитудно-фазовый	0,5	25
17	ДИД-0,6ТВ	36	0,6	400	2	134	40	238	200	1,19	0,67	0,2		0,6	40
18	ДИД-1ТВ	36	1	400	2	75,6	38	263	221	1,19	0,34	0,17		0,7	60
19	ДИД-2ТВ	36	2	400	2	37,8	20	204	146	1,4	0,26	0,14		0,8	75
20	ДИД-3ТВ	36	3	50	4	11	14	58	83	0,7	0,13	0,17		0,9	80
21	АДП-262	110	9,5	50	2	44	28	225	392	0,57	0,12	0,07	Амплитудный управление	0,5	-
22	АДП-362	110	19	500	2	27,5	19	213	236	0,9	0,12	0,07		0,6	-
23	АДП-263А	110	27,8	500	6	34,6	164	342	483	0,71	0,07	0,08		0,7	-
24	АДП-363А	110	46,4	400	6	15,5	121	310	241	1,29	0,06	0,34		0,8	-
25	ДИД-0,1	36	0,1	400	2	361	73	260	346	0,75	1,05	0,29		0,9	-
26	ДИД-0,5У	36	0,4	400	2	133	55	284	396	0,72	0,34	0,14	Амплитудно-фазовый	0,5	25
27	ДИД-0,6ТВ	36	0,6	400	2	134	4	238	200	1,19	0,67	0,2		0,6	40
28	ДИД-1ТВ	36	1	400	2	75,6	38	263	221	1,19	0,34	0,17		0,7	60
29	ДИД-2ТВ	36	2	400	2	37,8	20	204	146	1,4	0,26	0,14		0,8	75
30	ДИД-3ТВ	36	3	400	4	11	14	58	83	0,7	0,13	0,17		0,9	80

### Указания к выполнению задания 3

1. Определяется электромагнитная мощность при пуске при круговом поле

$$P_{\text{э.ко}} = \frac{2U_{\text{в}}}{r_{\text{Ry}}} \frac{1}{\gamma_S^2 (1 + s_{\text{к}}^2) + 2\rho_S},$$

где  $s_{\text{к}}$  – критическое скольжение симметричной машины, представляющее собой сочетание исходных относительных параметров схемы замещения:

$$s_{\text{к}} = \frac{1}{\xi_m \gamma_S} \sqrt{\rho_S^2 + (\xi_m + \xi_S)^2},$$

где  $\gamma_S = \sqrt{\rho_S^2 + \xi_S^2}$  – полное сопротивление обмотки управления, о. е.

2. Электромагнитную мощность определяем в зависимости от способа управления:

при амплитудном управлении:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{э.ко}} \left[ \left( \frac{1 + \alpha_e}{2} \right)^2 f_S - \left( \frac{1 - \alpha_e}{2} \right)^2 f_{2-s} \right];$$

при амплитудно-фазовом управлении:

$$P_{\text{э}} = P_{\text{э.ко}} \left[ \frac{1 + 2\alpha_e \sin \beta + \alpha_e^2}{4} f_S - \frac{1 - 2\alpha_e \sin \beta + \alpha_e^2}{4} f_{2-s} \right].$$

Здесь, введено выражение относительного момента (относительной электромагнитной мощности) симметричной машины:

$$f_s = \left( s_{\text{к}} + \frac{1}{s_{\text{к}}} + 2 \frac{\rho_S}{\gamma_S^2 s_{\text{к}}} \right) / \left( \frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{2\rho_S}{\gamma_S^2 s_{\text{к}}} \right),$$

которое представляет собой момент прямой последовательности в относительных единицах при круговом поле. Для нахождения момента обратной последовательности  $f_{2-s}$  в данном выражении вместо  $s$  надо подставить  $2-s$ .

3. Электромагнитный момент определяем из выражения

$$M_{\text{э}} = \frac{30P_{\text{э}}}{\pi n_{\text{с}}},$$

где  $n_{\text{с}} = \frac{60f}{p}$  – синхронная частота вращения;

$p$  – число пар полюсов.

4. Определяем полную механическую мощность

$$P = P_{\text{э}}(1 - s).$$

5. Изменяя в пунктах 2, 3, 4 скольжение  $s$  от 0 до 1 построить заданные характеристики и дать заключение о наличии либо отсутствии самохода у данного двигателя при заданных условиях управления.

### **ЧАСТНЫЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

На практике приходится решать ряд проектных задач при использовании имеющихся магнитных систем машины, сводящихся к пересчету обмоточных данных и фазосмещающего элемента (если он предусмотрен в схеме включения ИД), замене материалов и др. Большую часть пересчетов приходится делать из-за изменения условий работы двигателя.

Все задачи можно разбить на пять групп, связанных с изменением: 1) условий окружающей среды: температуры –  $\nu_{\text{окр}}$ , высоты над уровнем моря –  $H$ ; способа крепления машины и др.; 2) напряжение питающей сети; 3) схемы включения двигателя; 4) характера поля в машине (круговое, эллиптическое); 5) частоты питающей сети.

При пересчете двигателя для более сложных условий работы из-за изменения параметров окружающей среды (повышение температуры –  $\nu_{\text{окр}}$ , высоты над уровнем моря –  $H$ , или работы в вакууме) возможны замена обмоточного провода и других изоляционных материалов на более нагревостойкие; использование дополнительного теплоотвода; повышение теплоотдачи с поверхности закрытых машин за счет покрытия корпуса соответствующим лаком.

Иногда при изменении условий работы приходится изменять обмоточные данные двигателя и снижать уровень выходных показателей,



например значение пускового момента. При пересчете обмоточных данных следует контролировать коэффициент заполнения паза.

Рассмотрим примеры решения этих задач для двух двигателей: с полым ротором (ДИД-5ТВ) и с «беличьей клеткой» (ДМ-0,4). В условиях задач для упрощения опущен индекс S (статор) в числах витков фаз  $\omega_{Sy}$  ( $\omega_{SB}$ ), катушек  $\omega_{Sy.k}$  ( $\omega_{SB.k}$ ) и диаметров проводов  $d_{Sy}$  ( $d_{SB}$ ).

Таблица 6

Вариант	$r_{sy}$ Ом	$X_{sy}$ Ом	$X_{my}$ Ом	$r_{ry110^\circ}$ Ом	$r_{sb75^\circ}$ Ом	$\alpha_B$ ( $\alpha_{BK}$ )	$\alpha_y$ ( $\alpha_{yK}$ )
1	10	17	76	60	7	264(22)	372(31)
2	9,5	16	75	59,5	7	252(21)	372(31)
3	9	15,5	74	59,5	7	240(20)	360(30)
4	8,5	14	73	60	7,5	228(19)	360(30)
4	8	13	72	58,5	7,5	228(19)	348(29)
6	7,5	12,5	71	60	7,5	228(19)	348(29)
7	10	17	76	59	7	216(18)	348(29)
8	9,5	16,5	75	58	6,5	216(18)	336(28)
9	9	15	74	57	6	216(18)	336(28)
10	8,5	14,5	73	56	5,5	264(22)	372(31)
11	8	13	72	55	5	252(21)	372(31)
12	7,5	12,5	71	54	4,5	240(20)	360(30)
13	7	12,5	70	57	7	228(19)	360(30)
14	6,5	17	69	58	6,5	216(18)	348(29)
15	6	16,5	68	59	6	264(22)	372(31)
16	5,5	12	67	60	5,5	252(21)	372(31)
17	6,5	17	76	58,5	7,5	240(20)	360(30)
18	7	16	75	58	6	228(19)	360(30)
19	7,5	15,5	74	58,5	6	216(18)	348(29)
20	8	14	73	59	5,5	216(18)	336(28)
21	8,5	13	72	59	5,5	264(22)	372(31)
22	9	12,5	71	57	5,5	252(21)	372(31)
23	9,5	17	76	57	7,5	240(20)	360(30)
24	10	16,5	75	59,5	7,5	228(19)	360(30)
25	9	15	74	59,5	5	216(18)	348(29)

Вариант	$r_{sy}$ Ом	$X_{sy}$ Ом	$X_{my}$ Ом	$r_{ry110^\circ}$ Ом	$r_{sb75^\circ}$ Ом	$\alpha_B (\alpha_{BK})$	$\alpha_Y (\alpha_{YK})$
26	8	14,5	73	55	5	216(18)	336(28)
27	7	13	72	56	4,5	264(22)	372(31)
28	6	12,5	71	54,5	6	252(21)	372(31)
29	6,5	12,5	70	57	4,5	240(20)	360(30)
30	5	17	69	58	7	228(19)	360(30)

**Задача 4.** У двигателя закрытого исполнения с полым немагнитным ротором ДИД-5ТВ, работающего при сдвиге схемой:  $U_B=36$  В;  $U_Y=30$  В;  $f=400$  Гц; параметры схемы замещения  $r_{Sy75^\circ}=11$  Ом;  $x_{Sy}=18$  Ом;  $x_{my}=75$  Ом;  $r_{Ry110^\circ}=58,5$  Ом;  $r_{SB75^\circ}=6$  Ом; обмоточные данные:  $\omega_B=276$  ( $\omega_{BK}=23$ );  $d_B/d_{ви}=0,44/0,48$  мм;  $\omega_Y=384$  ( $\omega_{YK}=32$ );  $d_Y/d_{Yи}=0,38/0,42$  мм. Размеры корпуса:  $D_K=60,3$  мм;  $l_K=70,3$  мм;  $S_K=190,3$  см<sup>2</sup>.

Найти в режиме пуска: 1) потребляемые токи и мощности при температуре 20°C; 2) электромагнитную мощность и пусковой момент при температуре 20°C; 3) превышение температуры обмотки статора  $\theta_s$  при длительном стопорном режиме.

**Решение.** Так как параметры машины даны при нагретом ее состоянии, то производим пересчет всех активных сопротивлений для температуры 20°C.

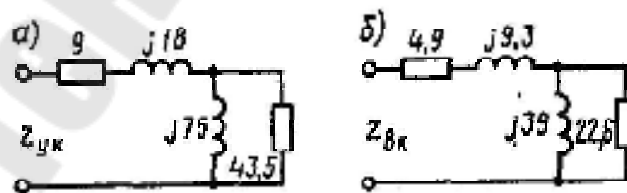


Рис. 3 Схемы замещения:

а — фазы управления; б — фазы возбуждения

Для пересчета активного сопротивления обмотки статора, выполненной из медного провода, используем формулу:

$\theta_s = [(r_{Sy,r} - r_{Sy,x})(235 + v_{окр})] / r_{Sy,x}$ , где  $\theta_s = v_s - v_{окр}$ . В нашем случае  $\theta_s = 75 - 20 = 55$  °C.

Решая уравнение:  $55r_{Sy.x} = (235 + 20)(11 - r_{Sy.x})$ , находим активное сопротивление обмотки У при  $20^\circ\text{C}$ :  $r_{Sy.x} = 11 \cdot 255 / (255 + 55) = 9 \text{ Ом}$

Значение активного сопротивления ротора из алюминия при  $v_s = 20^\circ\text{C}$  находим по формуле

$$\theta_R = [(r_{Ry.z} - r_{Ry.x})(245 + \vartheta_{окр})] / r_{Ry.x},$$

где  $\theta_R = \vartheta_R - \vartheta_{окр}$ .

Из уравнения, учитывая, что  $\theta_R = 110 - 20 = 90^\circ\text{C}$ , т.е.

$$90 = [(58,5 - r_{Ry.x})(245 + 20)] / r_{Ry.x},$$

Находим активное сопротивление ротора при  $\vartheta_R = 20^\circ\text{C}$ :  
 $r_{Ry.x} = 58,5 \cdot 265 / 335 = 43,5 \text{ Ом}$

Используемые схемы замещения фаз управления и возбуждения при пуске показаны на рис. 3.

Коэффициент трансформации  $k = a_{S\delta} / a_{Sy} = 276 / 384 = 0,72$ .

Активные и реактивные сопротивления схемы замещения фазы возбуждения:

$$x_{S\delta} = k^2 x_{Sy} = 0,72^2 \cdot 18 = 9,3 \text{ Ом}; \quad x_{m\delta} = k^2 x_{my} = 0,72^2 \cdot 75 = 39 \text{ Ом};$$

$$r_{R\delta} = k^2 r_{Ry} = 0,72^2 \cdot 43,5 = 22,6 \text{ Ом}$$

Находим сопротивление разветвления: намагничивающий контур- цепь ротора при пуске (рис.3.)

$$Z'_{Ry.k} = \frac{r_{Ry} \cdot jx_{my}}{r_{Ry} + jx_{my}} = \frac{43,5 \cdot j75}{43,5 + j75} = \frac{3262,5 \cdot e^{j90^\circ}}{86,5 \cdot e^{j60^\circ}} = 37,7 \cdot e^{j30^\circ},$$

$$Z'_{Ry.k} = 32,6 + j18,9$$

и полное сопротивление фазы:

$$Z'_{y.k} = (r_{Sy} + r'_{Ry.k}) + j(x_{Sy} + x'_{Ry.k}) = (9 + 32,6) + j(18 + 18,9) = 41,6 + j36,9 = 55,6 \cdot e^{j42^\circ}$$

Потребляемые при пуске ток и активная мощность управления:

$$I_{y.к} = U_{y.к} / Z_{y.к} = 30 / 55,6 = 0,54 A, \quad P_{y.к} = I_{y.к}^2 r_{y.к} = 0,54^2 \cdot 41,6 = 12,1 Bm$$

Сопротивление фазы возбуждения при пуске

$$Z_{\epsilon.к} = (r_{S\epsilon} + r'_{R\epsilon.к}) + j(x_{S\epsilon} + x'_{R\epsilon.к}) = (r_{S\epsilon} + k^2 r'_{Ry.к}) + j(x_{S\epsilon} + k^2 x'_{Ry.к}) = \\ (4,9 + 0,72^2 \cdot 32,6) + j(9,3 + 0,72^2 \cdot 18,9) = 21,8 + j19,1 = 29 \cdot e^{j41^\circ}$$

Потребляемый ток и активная мощность фазы возбуждения при пуске:

$$I_{\epsilon.к} = U_{\epsilon} / Z_{\epsilon.к} = 36 / 29 = 1,24 A,$$

$$P_{\epsilon.к} = I_{\epsilon.к}^2 r_{\epsilon.к} = 1,24^2 \cdot 21,8 = 33,5 Bm$$

Электромагнитная мощность при пуске:

$$P_{\epsilon y.к} = I_{y.к}^2 r'_{Ry.к} = 0,54^2 \cdot 32,6 = 9,5 Bm;$$

$$P_{\epsilon \epsilon.к} = I_{\epsilon.к}^2 r'_{R\epsilon.к} = 1,24^2 \cdot 16,9 = 26 Bm;$$

$$P_{\epsilon \epsilon.к} = 2\sqrt{P_{\epsilon y.к} \cdot P_{\epsilon \epsilon.к}} = 2\sqrt{9,5 \cdot 26} = 31,4 Bm.$$

Пусковой момент

$$M_{\kappa} = 30 \cdot P_{\epsilon \epsilon.к} / (\pi \cdot n_c) = 30 \cdot 31,4 / (\pi \cdot 8000) = 0,0374 H \cdot m.$$

Полная потребляемая мощность при пуске

$$P_{S\kappa} = P_{y.к} + P_{\epsilon.к} = 12,1 + 33,5 = 45,6 Bm.$$

Удельный тепловой поток

$$\sigma_S = P_{S\kappa} / S_{\kappa} = 45,6 / 190,3 = 0,24 Bm / cm^2.$$

Превышение температуры обмотки статора определяем, задаваясь предварительным значением превышения температуры корпуса  $\theta_{\kappa} = 130^\circ C$ . Корпус покрыт белым лаком  $k_{изл} = 0,8$ .

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_{\kappa} = k_{\alpha} \cdot 4,54 \sqrt{\theta_{\kappa} / D_{\kappa}} \cdot 10^{-4} = 1,03 \cdot 4,54 \sqrt{130 / 6,03} \cdot 10^{-4} = 10,1 \cdot 10^{-4} Bm / (cm^2 \cdot ^\circ C)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{изл} = \frac{5,64}{\theta_{\kappa}} \cdot k_{изл} \left[ \left( \frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4} =$$
$$= \frac{5,64}{130} \cdot 0,8 \left[ \left( \frac{293+130}{100} \right)^4 - \left( \frac{273+20}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4} = 8,56 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Превышение температуры корпуса:

$$\theta_{\kappa} = \sigma_S / (\alpha_{\kappa} + \alpha_{изл}) = [0,24 / (10,1 + 8,56)] \cdot 10^4 = 128,6^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры обмотки статора:

$$\theta_S = 1,05\theta_{\kappa} = 1,05 \cdot 128,6 = 135^\circ\text{C}.$$

Температура нагрева обмотки статора равна допустимой:

$$\vartheta_S = \theta_{\kappa} + \vartheta_{окр} = 135 + 20 = 155 \leq 155^\circ\text{C}.$$

**Задача 5.** Определить наибольший пусковой момент у двигателя ДИД-5ТВ, если температура окружающей среды  $\vartheta_{окр} = 100^\circ\text{C}$ , а допустимое значение температуры обмотки статора  $\vartheta_S = 155^\circ\text{C}$ , и найти новые обмоточные данные. Исходные данные для расчета взять из задачи 4.

При пересчете обмотки статора полагаем, что неизменными сохраняются коэффициенты заполнения пазов медью и соотношения потребляемых по фазам мощностей.

**Решение.** Допустимое превышение температуры обмотки статора и корпуса:

$$\theta_S = \vartheta_S - \vartheta_{окр} = 155 - 100 = 55^\circ\text{C},$$
$$\theta_{\kappa} = \theta_S / 1,05 = 55 / 1,05 = 52,4^\circ\text{C}.$$

Находим коэффициенты теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием:

$$\alpha_{\kappa} = k_{\alpha} \cdot 4,54 \sqrt{\frac{\theta_{\kappa}}{D_{\kappa}}} \cdot 10^{-4} = 1,03 \cdot 4,54 \sqrt{\frac{52,4}{6,03}} \cdot 10^{-4} = 7,95 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{изл} = \frac{5,64}{\theta_{\kappa}} \cdot k_{изл} \left[ \left( \frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4} =$$

$$= \frac{5,64}{52,4} \cdot 0,8 \left[ \left( \frac{376 + 52,4}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + 100}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^4 = 11,53 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} / (\text{см}^2 \cdot \text{°C})$$

Допустимый тепловой поток

$$\sigma'_S = \theta_{\kappa} (\alpha_{\kappa} + \alpha_{изл}) = 52,4(7,95 + 11,53) \cdot 10^{-4} = 0,102 \text{ Вт} / \text{см}^2.$$

Наибольшее возможное значение пускового момента

$$M'_{\kappa} = M_{\kappa} c'_S / c_S = 0,0374 \cdot 0,102 / 0,24 = 0,0159 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $M_{\kappa} = 0,0374 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при  $\sigma_S = 0,24 \text{ Вт} / \text{см}^2$  (см. задачу 4).

При окружающей температуре  $\vartheta_{окр} = +100^{\circ}\text{C}$  пусковой момент снизился на 58,1%.

Новые числа витков обмоток и катушек возбуждения и управления при условии, что они поровну делятся между 12 катушками, будут:

$$\omega'_e = \omega_e \sqrt{\sigma_S / \sigma'_S} = 276 \sqrt{0,24 / 0,102} \cong 420, \quad a'_{вк} = 35;$$

$$\omega'_y = \omega_y \sqrt{\sigma_S / \sigma'_S} = 384 \sqrt{0,24 / 0,102} \cong 588, \quad a'_{y.к} = 49.$$

Новые диаметры проводов обмоток возбуждения и управления ближайшие меньшие из дискретного ряда проводов:

$$d'_e = d_e \sqrt{\omega_{вк} / \omega'_{вк}} = 0,44 \sqrt{23 / 35} = 0,357, \quad d'_e = 0,355 \text{ мм},$$

$$d'_y = d_y \sqrt{\omega_{y.к} / \omega'_{y.к}} = 0,38 \sqrt{32 / 49} = 0,307, \quad d'_y = 0,3 \text{ мм}.$$

**Задача 6.** Какой наибольший пусковой момент может развить двигатель ДИД-5ТВ при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , если он имеет дополнительный теплоотвод площадью  $S_T = 2,5S_H$ ? Исходные данные двигателя взять из задачи 4. При пересчете обмоточных данных статора сохраняются неизменными коэффициент заполнения пазов медью и соотношения мощностей в фазах.

**Решение.** Допустимый удельный тепловой поток с учетом теплоотвода

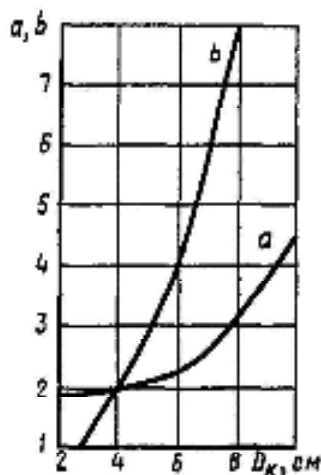


Рис. 4 Зависимости коэффициентов  $a$  и  $b$  от наружного диаметра корпуса  $D_k$

$$c'_S / c_S = a - c_S b = 2,3 - 0,24 \cdot 4 = 1,34; \quad \sigma'_S = 0,24 \cdot 1,34 = 0,321 \text{ Вт} / \text{см}^2.$$

Максимально допустимый пусковой момент  $M'_k = M_k c'_S / c_S = 0,0374 \cdot 1,34 = 0,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$  увеличился на 33,7% по сравнению с базовой машиной.

Числа витков обмоток возбуждения и управления (в обмотках по 12 катушек):

$$\omega'_e = \omega_e \sqrt{\sigma_S / \sigma'_S} = 276 \sqrt{0,24 / 0,321} \cong 240, \quad a'_{e.k} = 20;$$

$$\omega'_y = \omega_y \sqrt{\sigma_S / \sigma'_S} = 384 \sqrt{0,24 / 0,321} \cong 336, \quad a'_{y.k} = 28.$$

Новые диаметры проводов обмоток возбуждения и управления:

$$d'_e = d_e \sqrt{\omega_{e.k} / \omega'_{e.k}} = 0,44 \sqrt{23 / 20} = 0,472, \quad d'_e = 0,475 \text{ мм};$$

$$d'_y = d_y \sqrt{\omega_{y.k} / \omega'_{y.k}} = 0,38 \sqrt{32 / 28} = 0,41, \quad d'_y = 0,4 \text{ мм}.$$

**Задача 7.** Двигатель ДИД-5ТВ (см. исходные данные в задаче 4) имеет эллиптическое поле. Надо пересчитать обмоточные данные так, чтобы поле было круговым при неизменной суммарной потребляемой

мощности в режиме пуска, а также определить при этом пусковой момент в холодном состоянии машины ( $\vartheta_S = \vartheta_{окр} = 20^\circ C$ ).

**Решение.** Так как потребляемая мощность при пуске неизменна и машина будет иметь те же относительные параметры схемы замещения, то электромагнитная мощность при круговом поле  $P_{\text{э.ко}} = P_{Sk} \cdot \gamma_{ко}$ , где  $\gamma_{ко} = r'_{Ry.K} / r_{y.K} = 32,6 / 41,6 = 0,784$ ;  $P_{\text{э.ко}} = 45,6 \cdot 0,784 = 35,75 \text{ Вт}$ .

Новое значение пускового момента  $M_K = 30 P_{\text{э.ко}} / (\pi n_c) = 30 \cdot 35,75 / (\pi \cdot 8000) = 0,0426 \text{ Н} \cdot \text{м}$  увеличилось по сравнению с базовой машиной (см. задача 4) примерно на 14%.

Новые обмоточные данные с учетом равного распределения витков между 12 катушками фазы:

$$\omega'_{\text{в.к}} = \omega_{\text{в.к}} \sqrt{P_{\text{в.к}} / P'_{\text{в.к}}} = \omega_{\text{в.к}} \sqrt{2P_{\text{в.к}} / P_{Sk}} = 23 \sqrt{2 \cdot 33,5 / 45,6} = 28;$$

$$\omega'_{\text{у.к}} = \omega_{\text{у.к}} \sqrt{P_{\text{у.к}} / P'_{\text{у.к}}} = \omega_{\text{у.к}} \sqrt{2P_{\text{у.к}} / P_{Sk}} = 32 \sqrt{2 \cdot 12,1 / 45,6} = 23;$$

$P'_{\text{у.к}} = P'_{\text{в.к}} = P_{Sk} / 2$  при круговом поле,  $P_{\text{у.к}}, P_{\text{в.к}}$  - при эллиптическом (см. задачу 4);  $a'_\text{в} = a'_{\text{в.к}} \cdot 12 = 28 \cdot 12 = 336$ ;  
 $a'_\text{у} = a'_{\text{у.к}} \cdot 12 = 23 \cdot 12 = 276$ ;

$$d'_\text{в} = d_\text{в} \sqrt{\omega_{\text{в.к}} / \omega'_{\text{в.к}}} = 0,44 \sqrt{23 / 28} \cong 0,4 \text{ мм};$$

$$d'_\text{у} = d_\text{у} \sqrt{\omega_{\text{у.к}} / \omega'_{\text{у.к}}} = 0,38 \sqrt{32 / 23} = 0,45 \text{ мм}.$$

**Задача 8.** Двигатель ДИД-5ТВ (исходные данные см. в задаче 4) включается в однофазную сеть. Необходимо подобрать значение фазосдвигающей емкости и напряжение сети так, чтобы условия работы при пуске не изменились.

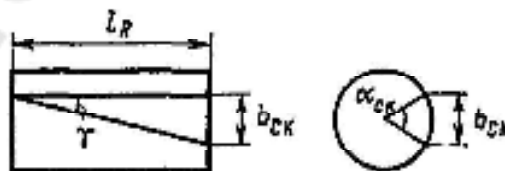


Рис. 5. Определение центрального угла склона

**Решение.** Из условия сдвига по фазе напряжений или токов в обмотках на угол  $\pi/2$  реактивное сопротивление конденсатора и его емкость:



$$x_{Co} = k^2 Z_{y,k}^2 / x_{y,k} = 0,72 \cdot 55,6^2 / 36,9 = 43,4 \text{ Ом}$$

$$C = 10^6 / (2\pi f x_{Co}) = 10^6 / (2\pi \cdot 400 \cdot 43,4) = 9,17 \text{ мкФ}$$

Выбираем  $C=10 \text{ мкФ}$ .

Так как условия работы при пуске не изменяются, то остаются неизменными ток и мощность в фазе возбуждения, поэтому напряжение сети  $U_c = U_{\phi} Z'_{\phi,k} / Z_{\phi,k}$ ,

где  $Z'_{\phi,k} = Z_{\phi,k} - jx_C = 21,8 + j19,1 - j43,4 = 21,8 - j24,3 = 32,7 \cdot e^{-j48,1}$ ;  
 $U_c = 36 \cdot 32,7 / 21,8 = 54 \text{ В}$ .

**Задача 9.** У исполнительного двигателя с ротором типа «беличья клетка» ДМ-0,4 требуется заменить материал «клетки» (алюминий на медь) без изменения выходных показателей. В этом двигателе  $2p = 6$ ;  $D_R = 9,92 \text{ мм}$ ;  $Z_R = 20$ ;  $l_R = 10 \text{ мм}$ , скос пазов на роторе  $\gamma = 14^\circ 30'$  (рис. 5).

**Решение.** Изменение материала ротора оказывает влияние на активное сопротивление ротора  $r_{Ry}$ . Чтобы выходные данные двигателя не изменились, надо сохранить  $r_{Ry} = \text{const}$ . Так как  $r_{Ry} \approx \rho_R / k_{ск}^2$ , то с уменьшением удельного сопротивления материала ротора  $\rho_R = \rho_{Al} = 0,029 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ,  $\rho'_R = \rho_{Cu} = 0,0175 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$  надо в той же степени уменьшить квадрат коэффициента скоса—  $k_{ск}^2$ .

Найдем коэффициент скоса для двигателя ДМ-0,4 с алюминиевой «беличьей клеткой».

Зубцовое деление ротора:  $t_{ZR} = \pi D_R / Z_R = \pi \cdot 9,92 / 20 = 1,56 \text{ мм}$ .

Скос выполняется на  $\beta_{ск}$  зубцовых делений ротора:

$$\beta_{ск} = l_R \cdot \text{tg} \gamma / t_{ZR} = 10 \text{tg} 14^\circ 30' / 1,56 = 1,66.$$

Коэффициент скоса

$$k_{ск} = \frac{\sin \frac{\alpha_{ск}}{2}}{\frac{\alpha_{ск}}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi p}{Z_R} \cdot \beta_{ск}}{\frac{\pi p}{Z_R} \cdot \beta_{ск}} = \frac{\sin \frac{180^\circ \cdot 3}{20} \cdot 1,66}{\frac{\pi \cdot 3}{20} \cdot 1,66} = 0,901.$$

У двигателя с медной «беличьей клеткой» коэффициент скоса надо уменьшить до  $k'_{ск} = k_{ск} \sqrt{\rho'_R / \rho_R} = 0,901 \cdot \sqrt{0,0175 / 0,029} = 0,7$ . Этому коэффициенту скоса соответствует скос на три зубцовых деления ( $\beta_{ск} = 3$ ).

Делаем проверку:

$$k'_{ck} = \sin[(180 \cdot 3 / 20)3] / [(\pi \cdot 3 / 20)3] = 0,7.$$

Новый угол  $\gamma$  будет равен:

$$\operatorname{tg} \gamma = \beta'_{ck} t_{ZR} / l_R = 3 \cdot 1,56 / 10 = 0,468; \quad \gamma = 25^\circ.$$

**Задача 10.** Используя магнитную систему двигателя ДИД-5ТВ, пересчитать его частоту  $f=1000$  Гц (данные частоты приведены в таблице 7),  $U_y = 30$  В;  $U_e = 36$  В. Найти новые обмоточные данные и пусковой момент.

По сравнению с базовой машиной (см. задачу 4) должны сохраниться плотность теплового потока  $\sigma_s$  и соотношение мощностей в фазах при пуске. Самоход не допускается. Расчет ведется для  $20^\circ\text{C}$ .

Таблица 7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f, \text{Гц}$	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$f, \text{Гц}$	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	1100
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f, \text{Гц}$	1150	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	1950

Для обеспечения отсутствия самохода при невозможности уменьшения толщины полого ротора по соображениям механической прочности существуют два пути решения задачи: а) увеличение вдвое числа пар полюсов; б) изменение материала ротора (алюминий  $\rho_{Al20^\circ} = 0,029 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$  на дюралюминий Д1-Т  $\rho_{DAl20^\circ} = 0,054 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ) при сохранении неизменным относительного сопротивления взаимоиндукции  $\xi_m$  путем увеличения суммарного воздушного зазора.

**Решение.** Рассмотрим увеличение числа полюсов. При пересчете двигателя ДИД-5ТВ с  $f = 400$  Гц (см. задачу 4) на  $f' = 1000$  Гц увеличиваем число полюсов вдвое:  $2p' = 12$ . Принимаем, что из-за увеличения числа полюсов (уменьшения полюсного деления) за счет изменения длины лобовых частей относительное активное сопротивление обмотки статора уменьшится на 20%:  $\rho'_{Sy} = 0,8 \rho_{Sy} = 0,8 \cdot 9 / 43,5 = 0,166$ . Относительное сопротивление взаимоиндукции уменьшится в 1,6 раза:

$$\xi'_{my} = \xi_{my} \cdot \frac{f' \cdot p^2}{f \cdot (p')^2} = \frac{75}{43,5} \cdot \frac{1000}{400} \cdot \frac{3^2}{6^2} = 1,08.$$

Изменение обмоточных коэффициентов

$$\frac{k'_0}{k_0} = \frac{q' \cdot \sin(45/q')}{q \cdot \sin(45/q)} = \frac{\sin 45}{2 \sin(45/2)} = \cos(45/2) = 0,924.$$

$$\xi'_{Sy} = \xi_{Sy} \cdot \frac{f' p q k_0^2}{f p' q' (k'_0)^2} = \frac{18 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 2}{43,5 \cdot 400 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 0,924^2} = 1,208.$$

Относительное сопротивление фазы управления при пуске

$$\gamma'_{y.k} = (\rho'_{Sy} + \rho''_{Ry.k}) + j(\xi'_{Sy} + \xi''_{Ry.k}) = \rho'_{y.k} + j\xi'_{y.k},$$

где  $\rho''_{Ry.k} = (\xi'_{my})^2 / [1 + (\xi'_{my})^2] = 1,08^2 / (1 + 1,08^2) = 0,538$ ;

$$\xi''_{Ry.k} = \xi'_{my} / [1 + (\xi'_{my})^2] = 1,08 / (1 + 1,08^2) = 0,499;$$

$$\gamma'_{y.k} = (0,166 + 0,538) + j(1,208 + 0,499) = 0,704 + j1,707 = 1,85e^{j68^\circ}.$$

Так как активная потребляемая мощность фазы управления при пуске не изменяется, то находим новое значение активного сопротивления ротора, приведенное к обмоточным данным фазы управления:

$$r'_{Ry} = U_y^2 \rho'_{y.k} / [P_{y.k} (\gamma'_{y.k})^2] = 30^2 \cdot 0,704 / (12,1 \cdot 1,85^2) = 15,3 \text{ Ом}.$$

Отношение потребляемых фазами активных мощностей не изменяется:  $P'_{\epsilon.k} / P'_{y.k} = U_{\epsilon}^2 / (kU_y)^2 = const$ , сохраняется коэффициент трансформации  $k = 0,72$ .

Новое число витков обмоток управления и возбуждения, числа витков в катушках и диаметры проводов соответственно:

$$\omega'_y = \frac{k_0}{k'_0} \omega_y \sqrt{r'_{Ry} / r_{Ry}} = \frac{1}{0,924} \cdot 384 \sqrt{15,3 / 43,5} = 264; \quad a'_{y.k} = 22;$$

$$a'_{\epsilon} = k a'_y = 0,72 \cdot 264 \cong 204; \quad a'_{\epsilon.k} = 17;$$

$$d'_{\epsilon} = d_{\epsilon} \sqrt{\omega_{\epsilon.k} / \omega'_{\epsilon.k}} = 0,44 \cdot \sqrt{23 / 17} = 0,51; \quad d'_{\epsilon} = 0,5 \text{ мм};$$

$$d'_y = d_y \sqrt{\omega_{y.к} / \omega'_{y.к}} = 0,38 \sqrt{32 / 22} = 0,458; \quad d'_y = 0,45 \text{ мм}.$$

Электромагнитная мощность при пуске:

$$P'_{\text{э.у.к}} = \frac{1}{r'_{Ry}} \left( \frac{U_y}{\gamma'_{y.к}} \right)^2 \rho'_{Ry.к} = \frac{1 \cdot 30^2 \cdot 0,538}{15,3 \cdot 1,85^2} = 9,25 \text{ Вт};$$

$$P'_{\text{э.в.к}} = \frac{1}{k^2 r'_{Ry}} \left( \frac{U_\epsilon}{\gamma'_{y.к}} \right)^2 \rho'_{Ry.к} = \frac{1 \cdot 36^2 \cdot 0,538}{0,72^2 \cdot 15,3 \cdot 1,85^2} = 26,7 \text{ Вт};$$

$$P'_{\text{э.к}} = 2 \sqrt{P'_{\text{э.у.к}} \cdot P'_{\text{э.в.к}}} = 2 \sqrt{9,25 \cdot 26,7} = 30,8 \text{ Вт}.$$

Пусковой момент

$$M_k = 30 P'_{\text{э.к}} / (\pi n_c) = 30 \cdot 30,8 / (\pi \cdot 10000) = 0,0293 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $n_c = 60 f' / p' = 60 \cdot 1000 / 6 = 10000 \text{ об} / \text{мин}$ .

Теперь решим задачу заменой материала ротора. При пересчете двигателя на частоту  $f' = 1000$  Гц (частота увеличивается в 2,5 раза) и переходе на другой материал ротора — дюралюминий Д1-Тр $'_{R20^\circ} = 0,054 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$  (удельное сопротивление возрастает в 1,86 раза) изменятся относительные сопротивления схемы замещения по отношению к базовой машине (см. задачу 4) соответственно:

$$\xi'_{my} = \xi_{my} \frac{f' \rho_R}{f \rho'_R} = \frac{75}{43,5} \cdot \frac{1000}{400} \cdot \frac{0,029}{0,054} = 2,28;$$

$$\rho'_{Sy} = \rho_{Sy} \rho_R / \rho'_R = (9 / 43,5) \cdot 0,029 / 0,054 = 0,111;$$

$$\xi'_{Sy} = \xi_{Sy} \frac{f'}{f} \cdot \frac{\rho_R}{\rho'_R} = \frac{18}{43,5} \cdot \frac{1000}{400} \cdot \frac{0,029}{0,054} = 0,555.$$

Для обеспечения отсутствия самохода необходимо сохранить относительное сопротивление взаимной индукции  $\xi'_{my} = 1,72$  базовой машины на прежнем уровне, и поэтому приходится увеличить воздушный зазор машины в  $2,28 / 1,72 = 1,33$  раза и сделать  $c' = 1,33 \cdot 0,5 \approx 0,7 \text{ мм}$ .

Тогда относительное полное сопротивление фазы управления при пуске

$$\gamma'_{y.к} = (\rho'_{Sy} + \rho'_{Ry.к}) + j(\xi'_{Sy} + \xi'_{Ry.к}) = (0,111 + 32,6/43,5) + j(0,555 + 18,9/43,5) = 0,86 + j0,99 = 1,31e^{j49^\circ}.$$

Так как активная потребляемая мощность фазы управления при пуске не изменяется, то находим новое активное сопротивление ротора, приведенное к обмоточным данным этой фазы:

$$r'_{Ry} = \frac{U_y^2 \rho'_{y.к}}{P_{y.к} \gamma'^2_{y.к}} = \frac{30^2 \cdot 0,86}{12,1 \cdot 1,31^2} = 37,8 \text{ Ом}.$$

Новые обмоточные данные фазы управления и возбуждения, учитывая, что коэффициент трансформации  $k$  не изменяется и равен 0,72:

$$\omega'_y = \omega_y \sqrt{r'_{Ry} \rho_R / r_{Ry} \rho'_R} = 384 \sqrt{37,8 \cdot 0,029 / 43,5 \cdot 0,054} = 264;$$

$$a'_{yк} = 22; d'_y = d_y \sqrt{\omega_{yк} / \omega'_{yк}} = 0,38 \sqrt{32 / 22} = 0,458.$$

Принимаем  $d'_y = 0,45 \text{ мм}$ :

$$a'_\epsilon = ka'_y = 0,72 \cdot 264 \cong 192; a'_{\epsilonк} = 16; d_\epsilon = 0,44 \cdot \sqrt{23/16} = 0,528.$$

Электромагнитная мощность при пуске

$$P'_{\epsilon.к} = \frac{1}{r'_{Ry}} \left( \frac{U_y}{\gamma'_{yк}} \right)^2 \rho'_{Ryк} = \frac{30^2 \cdot 0,749}{37,8 \cdot 1,32^2} = 10,39 \text{ Вт}.$$

$$P'_{\epsilon.вк} = \frac{1}{k^2 r'_{Ry}} \left( \frac{U_\epsilon}{\gamma'_{yк}} \right)^2 \rho'_{Ryк} = \frac{1}{0,72^2 \cdot 37,8} \cdot \frac{36^2}{1,31^2} \cdot 0,749 = 28,87 \text{ Вт}.$$

$$P'_{\epsilon.к} = 2 \sqrt{P'_{\epsilon.к} \cdot P'_{\epsilon.вк}} = 2 \sqrt{10,39 \cdot 28,87} = 34,6 \text{ Вт}.$$

Пусковой момент

$$M_k = 30 P'_{\epsilon.к} / (\pi n_c) = 30 \cdot 34,6 / (\pi \cdot 10000) = 0,033 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические машины и микромашины. Учебник для вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высш. школа, 1981. – 432 с.
2. Электрические машины автоматических систем. М. М. Кацман, Ф. М. Юферов. – М.: Высш. школа, 1979. – 261 с.
3. Электрические микромашины. Арменский Е. В., Фалк Г. Б. – М.: Высш. Школа, 1975. – 237 с.
4. Лопухина Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики: – М.: Высш. школа, 1988. – 328 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Тахогенераторы .....	3
Задание 1.....	6
Быстродействие исполнительных двигателей при различных методах управления.....	8
Задание 2.....	12
Задание 3.....	13
Частные задачи расчета исполнительных двигателей.....	16
Задание 4.....	18
Задание 5.....	21
Задание 6.....	22
Задание 7.....	23
Задание 8.....	24
Задание 9.....	25
Задание 10.....	26
Рекомендуемая литература.....	30

**Логвин Владимир Васильевич**

# **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Практикум  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано в печать 12.01.10.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,54.

Изд. № 197.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.