

2. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Общие сведения

Электрические машины постоянного тока используются в промышленности в основном в качестве электродвигателя или генератора малой и средней мощности.

Основными частями электродвигателя постоянного тока являются: ярмо (индуктор), главные и дополнительные полюса с обмотками; сердечник якоря с обмоткой; щеточно-коллекторное устройство, подшипниковые щиты.

Электрический двигатель постоянного тока преобразует подводимую к нему электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию вращения.

В зависимости от схемы электрического соединения его обмотки возбуждения относительно обмотки якоря различают следующие способы возбуждения магнитного потока: независимое, последовательное, параллельное и смешанное.

При работе электрической машины постоянного тока в режиме электродвигателя под действием напряжения, подводимого к якорю, в его обмотке появляется ток I_a . В результате взаимодействия этого тока с магнитным потоком, созданным обмоткой возбуждения электродвигателя, возникает электромагнитный вращающий момент

$$M = C_0 \Phi I_a,$$

где $C_0 = \frac{pN}{2\pi a}$ – постоянный коэффициент.

Здесь p – число пар полюсов электрической машины;

N – число эффективных проводников обмотки якоря;

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

При вращении якоря в проводниках его обмотки под действием магнитного потока возбуждения будет индуцироваться электродвижущая сила E_a , направление которой противоположно направлению тока I_a , поэтому ее называют противо-ЭДС. Величина электродвижущей силы зависит от частоты вращения якоря Ω и магнитного потока возбуждения Φ

$$E_a = C_0 \Phi \Omega.$$

Приложенное к зажимам обмотки якоря электродвигателя напряжение U_a уравнивается противо-ЭДС E_a и падением напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря

$$U_a = E_a + I_a R_a.$$

Тогда ток обмотки якоря электродвигателя определяется следующим выражением

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a}.$$

При пуске электродвигателя в ход в первый момент времени после подключения его к сети постоянного тока якорь остается неподвижным и противо-ЭДС равна нулю. Поэтому при прямом пуске электродвигателя пусковой ток его обмотки якоря будет зависеть только от напряжения сети и сопротивления обмотки якоря

$$I_{ап} = \frac{U_a}{R_a}.$$

Он может превышать номинальное значение тока якоря в 10÷30 раз. Для уменьшения пускового тока в цепь обмотки якоря вводят добавочное пусковое сопротивление $R_{п}$ и тогда

$$I_{ап} = \frac{U_a}{R_a + R_{п}}.$$

По мере разгона противо-ЭДС нарастает, и пусковое сопротивление выводится из цепи якоря. В установившемся режиме электромагнитный вращающий момент, развиваемый электродвигателем, уравновешивается моментом сопротивления на валу

$$M = M_c.$$

Под механической характеристикой электродвигателя постоянного тока понимают зависимость установившейся частоты вращения от электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем $\Omega = f(M)$. Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока называется естественной, если она снята при номинальном напряжении сети U_a , номинальном потоке возбуждения Φ и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря R_d . Все остальные механические характеристики электродвигателя – искусственные.

В общем случае механическая характеристика электродвигателя постоянного тока имеет вид

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{дп} + R_d)}{C_0^2 \Phi^2} M,$$

где $R_a + R_{дп}$ – суммарное электрическое сопротивление обмотки якоря, включая последовательную обмотку добавочных полюсов с сопротивлением $R_{дп}$.

В электродвигателях постоянного тока независимого и параллельного возбуждения различают следующие способы регулирования частоты вращения якоря:

- якорное регулирование частоты вращения изменением напряжения питающей сети ($U_a = \text{var.}$);
- полюсное регулирование частоты вращения изменением магнитного потока полюсов путем введения добавочного сопротивления в обмотку возбуждения ($\Phi = \text{var.}$);
- реостатное регулирование частоты вращения введением добавочного сопротивления в цепь якоря ($R_d = \text{var.}$).

К номинальным данным электрической машины постоянного тока относятся следующие параметры:

- номинальная мощность $P_{ном}$ (для электродвигателя – полезная механическая мощность на валу);
- номинальный ток цепи обмотки якоря $I_{аном}$;
- номинальное напряжение на главных зажимах электрической машины $U_{аном}$;
- номинальная частота вращения якоря $n_{ном}$ (об./мин.);
- номинальный коэффициент полезного действия машины $\eta_{ном}$.

2.2. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока независимого возбуждения»

1. В соответствии с предложенным вариантом задания из таблицы 2.3.1 выбрать электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения серии 2П.

2. Определить ток обмотки якоря $I_{аном}$, потребляемый электродвигателем из сети при номинальной нагрузке.

3. Определить номинальный электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя.

4. Рассчитать пусковой электромагнитный момент электродвигателя при пусковом токе $I_{ап} = 2I_{аном}$ (без учета реакции якоря) и соответствующее сопротивление пускового реостата.

5. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения $\Omega = f(M)$.

6. Рассчитать и построить семейство искусственных механических характеристик электродвигателя при якорном регулировании частоты вращения при $\frac{U_a}{U_{аном}}$ равном 0,33; 0,67; 1,00 от номинального.

7. Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику электродвигателя $\Omega = f(M)$ при введении в цепь якоря добавочного сопротивления равного $R_d = 9(R_a + R_{дп})$. При этом считать, что электромагнитный момент на валу электродвигателя остался неизменным и равным номинальному.

8. Считая характеристику холостого хода электродвигателя линейной, рассчитать и построить искусственную механическую характеристику $\Omega = f(M)$ при введении в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления $R_{вд} = 0,3R_v$.

9. Рассчитать и построить семейство механических характеристик при реостатном пуске электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения в диапазоне изменения момента $M = (1,2 \div 2,0)M_{ном}$. Определить скорости переключения, число ступеней пускового реостата и сопротивления его секций.

10. Подобрать по каталогу (смотри приложение 2) соответствующее электродвигателю пусковое сопротивление.

11. Нарисовать схему включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Объяснить назначение добавочных сопротивлений в контурах машины.

12. Заключение сформулировать в виде пояснений по следующим вопросам:

- назвать основные элементы конструкции электрической машины постоянного тока;
- объяснить устройство щеточно-коллекторного узла, назначение коллектора и щеток в электродвигателе постоянного тока;
- охарактеризовать естественную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, указать причины уменьшения частоты вращения с ростом нагрузки;
- пояснить, каким образом осуществляется якорное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого

возбуждения. Обосновать достоинства и недостатки данного способа регулирования;

– как реализуется реостатное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Дать характеристику реостатному регулированию частоты вращения, указав на его достоинства и недостатки;

– как реализуется полюсное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения; его достоинства и недостатки;

– назвать способы пуска электродвигателя постоянного тока;

– описать процесс реостатного пуска электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения;

– пояснить по каким параметрам выбирается пусковой реостат;

– объяснить назначение добавочных сопротивлений в контурах электродвигателя постоянного тока.

2.3. Технические данные двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии 2П с высотами осей вращения 112÷315

В таблице 2.3.1 приведены основные технические данные электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения средней мощности с высотами оси вращения 112÷315 мм.

Таблица 2.3.1. Технические данные электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения

№	Типоразмер двигателя	$P_{ном}$ кВт	U , В	n , об./ мин.	η , %	Сопротивления обмоток при 15°С, Ом		
						R_a	$R_{дп}$	R_B
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.	2ПН112МУХЛ4	3,6	110	3150	78,5	0,084	0,089	33,6
02.	2ПН112ЛУХЛ4	5,6	110	3350	79,5	0,46	0,051	25,3
03.	2ПН132МУХЛ4	4,0	220	1500	79,0	0,564	0,336	134
04.	2ПН132МУХЛ4	7,0	220	2240	83,0	0,226	0,166	111

1	2	3	4	5	6	7	8	9
05.	2ПН132МУХЛ4	10,5	220	3000	84,0	0,140	0,094	111
06.	2ПН132ЛУХЛ4	5,5	220	1500	80,5	0,322	0,270	101
07.	2ПН132ЛУХЛ4	8,5	220	2200	84,0	0,167	0,124	89
08.	2ПН132ЛУХЛ4	14,0	220	3150	86,5	0,322	0,270	76
09.	2ПБ132МУХЛ4	3,7	110	2200	79,5	0,104	0,059	54,5
10.	2ПБ132МУХЛ4	4,5	110	3150	81,0	0,046	0,029	54,5
11.	2ПБ132ЛУХЛ4	3,2	110	1600	82,0	0,120	0,089	50
12.	2ПБ132ЛУХЛ4	4,5	220	2200	84,0	0,269	0,220	189
13.	2ПБ132ЛУХЛ4	5,3	220	3000	85,5	0,167	0,124	216
14.	2ПО132ЛУХЛ4	6,7	220	3000	86,0	0,120	0,089	138
15.	2ПФ132МУХЛ4	7,5	220	3000	85,0	0,140	0,094	111
16.	2ПФ132ЛУХЛ4	11,0	220	3000	85,5	0,080	0,066	76
17.	2ПН160МУХЛ4	13,0	220	2120	85,5	0,081	0,056	61,5
18.	2ПН160МУХЛ4	18,0	220	3150	87,0	0,037	0,024	53,1
19.	2ПН160ЛУХЛ4	11,0	220	1500	85,5	0,096	0,073	65,3
20.	2ПН160ЛУХЛ4	16,0	440	2360	87,5	0,71	0,131	13,4
21.	2ПН160ЛУХЛ4	24,0	220	3150	88,0	0,024	0,017	49,4
22.	2ПБ160МУХЛ4	4,2	220	1500	84,5	0,326	0,208	177
23.	2ПБ160МУХЛ4	6,0	220	2120	86,5	0,145	0,101	177
24.	2ПБ160ЛУХЛ4	8,1	220	3350	86,5	0,044	0,031	181
25.	2ПБ160ЛУХЛ4	7,5	220	2240	88,0	0,096	0,073	181
26.	2ПО160МУХЛ4	9,5	220	3000	87,5	0,081	0,056	148
27.	2ПБ180МУХЛ4	3,4	220	800	81,0	0,486	0,296	150

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28.	2ПБ180МУХЛ4	12,0	220	3350	87,5	0,038	0,025	197
29.	2ПБ180ЛУХЛ4	5,6	440	1000	84,5	0,990	0,644	131
30.	2ПО180МУХЛ4	4,5	220	750	79,5	0,486	0,292	114
31.	2ПО180МУХЛ4	14,0	220	2120	89,0	0,058	0,037	98
32.	2ПО180МУХЛ4	17,0	220	3000	89,0	0,038	0,025	132
33.	2ПО180ЛУХЛ4	5,2	220	800	81,5	0,260	0,183	72,5
34.	2ПО180ЛУХЛ4	7,5	220	1000	84,0	0,168	0,110	72,5
35.	2ПО180ЛУХЛ4	16,0	440	2120	89,5	0,168	0,110	72,5
36.	2ПО180ЛУХЛ4	20,0	220	3000	90,0	0,025	0,018	98,5
37.	2ПФ180МУХЛ4	12,0	220	1060	82,0	0,150	0,092	49,2
38.	2ПФ180МУХЛ4	26,0	220	3150	89,0	0,022	0,015	49,2
39.	2ПФ180ЛУХЛ4	18,5	220	1500	87,0	0,065	0,044	46,7
40.	2ПФ180ЛУХЛ4	25,0	440	2200	89,5	0,136	0,084	46,0
41.	2ПФ180ЛУХЛ4	32,0	440	3150	90,5	0,065	0,044	46,7
42.	2ПН200МУХЛ4	8,5	220	800	82,0	0,188	0,116	61,6
43.	2ПН200МУХЛ4	13,0	220	1120	85,0	0,106	0,061	61,6
44.	2ПН200МУХЛ4	36,0	220	2200	88,5	0,026	0,016	46,0
45.	2ПН200МУХЛ4	60,0	440	3150	90,5	0,047	0,029	35,0
46.	2ПН200ЛУХЛ4	16,0	220	1000	86,0	0,083	0,053	55,0
47.	2ПН200ЛУХЛ4	53,0	440	2360	90,5	0,055	0,037	31,7
48.	2ПБ200ЛУХЛ4	6,0	220	800	84,5	0,220	0,150	137
49.	2ПБ200ЛУХЛ4	11,0	440	1500	89,0	0,286	0,168	137
50.	2ПФ200МУХЛ4	22,0	220	1600	87,5	0,047	0,029	46

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
51.	2ПФ200МУХЛ4	30,0	440	2200	90,0	0,106	0,061	46
52.	2ПФ200МУХЛ4	40,0	440	3000	90,5	0,071	0,041	96
53.	2ПФ200ЛУХЛ4	42,0	440	2360	90,5	0,055	0,037	31,7
54.	2ПФ200ЛУХЛ4	55,0	440	3150	91,0	0,031	0,020	31,7
55.	2ПО200МУХЛ4	6,0	220	750	83,5	0,294	0,100	96,0
56.	2ПО200МУХЛ4	9,0	220	1060	86,0	0,143	0,073	96,0
57.	2ПО200МУХЛ4	14,0	220	1500	88,0	0,071	0,042	96,0
58.	2ПО200МУХЛ4	20,0	220	2360	89,5	0,026	0,016	74,0
59.	2ПО200ЛУХЛ4	11,0	220	1000	86,5	0,125	0,080	102
60.	2ПО200ЛУХЛ4	17,0	220	1500	89,0	0,055	0,037	102
61.	2ПН225МУХЛ4	7,5	220	1500	77,0	0,350	0,101	82,43
62.	2ПН225МУХЛ4	11,0	220	600	79,5	0,202	0,068	62,25
63.	2ПН225МУХЛ4	22,0	220	1000	82,0	0,086	0,043	62,25
64.	2ПН225ЛУХЛ4	30,0	440	1060	84,5	0,196	0,070	38,5
65.	2ПН250МУХЛ4	15,0	220	530	80,0	0,142	0,078	37,9
66.	2ПН250МУХЛ4	18,0	220	630	80,5	0,110	0,054	37,9
67.	2ПН250МУХЛ4	22,0	440	850	81,0	0,235	0,096	28,7
68.	2ПН250МУХЛ4	37,0	440	1060	85,0	0,152	0,078	28,7
69.	2ПН250МУХЛ4	50,0	440	1500	87,0	0,110	0,054	29,8
70.	2ПН250МУХЛ4	55,0	440	1700	87,0	0,059	0,026	20,2
71.	2ПН250ЛУХЛ4	22,0	340	630	82,0	0,158	0,093	33,4
72.	2ПН250ЛУХЛ4	28,0	440	750	83,0	0,260	0,110	33,4
73.	2ПН250ЛУХЛ4	45,0	220	1000	85,5	0,030	0,016	25,1

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
74.	2ПН250ЛУХЛ4	71,0	440	1500	88,5	0,065	0,031	31,2
75.	2ПФ250ЛУХЛ4	22,0	220	500	78,0	0,122	0,064	33,4
76.	2ПФ250ЛУХЛ4	26,5	440	600	81,5	0,380	0,195	34,7
77.	2ПФ250ЛУХЛ4	28,0	220	600	82,2	0,082	0,047	33,4
78.	2ПФ250ЛУХЛ4	30,0	220	750	84,3	0,050	0,031	33,4
79.	2ПФ250ЛУХЛ4	37,0	340	750	83,2	0,122	0,064	25,1
80.	2ПФ250ЛУХЛ4	45,0	340	1180	86,0	0,065	0,031	33,4
81.	2ПН280МУХЛ4	30,0	440	600	84,5	0,185	0,082	30,0
82.	2ПН280МУХЛ4	110	440	1500	89,5	0,034	0,015	30,0
83.	2ПН280ЛУХЛ4	37,0	440	600	86,0	0,147	0,069	26,6
84.	2ПН280ЛУХЛ4	132	440	1500	90,6	0,025	0,012	25,2
85.	2ПФ280МУХЛ4	75,0	220	1000	88,5	0,016	0,008	22,8
86.	2ПФ280МУХЛ4	110	220	1500	89,0	0,008	0,004	22,8
87.	2ПФ280ЛУХЛ4	55	220	750	87,5	0,025	0,012	25,2
88.	2ПФ280ЛУХЛ4	85	440	1000	88,7	0,050	0,025	19,7
89.	2ПН315МУХЛ4	100	440	1000	88,0	0,040	0,024	25,6
90.	2ПН315МУХЛ4	110	220	1000	89,0	0,008	0,005	18,8
91.	2ПН315МУХЛ4	160	220	1500	90,0	0,004	0,003	25,6
92.	2ПН315ЛУХЛ4	45	440	500	86,9	0,128	0,065	21,0
93.	2ПН315ЛУХЛ4	55	440	630	88,0	0,074	0,032	14,8
94.	2ПН315ЛУХЛ4	118	440	1000	89,0	0,032	0,016	21,0
95.	2ПН315ЛУХЛ4	132	440	1060	90,0	0,006	0,004	21,1
96.	2ПН315ЛУХЛ4	200	220	1500	91,0	0,003	0,002	21,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
97.	2ПФ315МУХЛ4	55	220	600	87,0	0,029	0,004	34,0
98.	2ПФ315МУХЛ4	160	440	1900	90,0	0,012	0,007	25,6
99.	2ПФ315ЛУХЛ4	90	220	750	88,0	0,013	0,008	21,0
00.	2ПФ315ЛУХЛ4	220	220	1500	91,0	0,003	0,002	21,0

Для электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения установлена следующая структура обозначения типоразмера:

2П	Н	112	М	УХЛ	4
↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	2	3	4	5	6

1 – серия электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения – 2П;

2 – конструктивное исполнение электродвигателя постоянного тока: «Н» – самовентилирующиеся электродвигатели; «Б» – электродвигатели с естественным охлаждением; «О» – с наружным обдувом электродвигателя от постороннего вентилятора; «Ф» – с независимой вентиляцией электродвигателя от постороннего вентилятора;

3 – высота оси вращения в миллиметрах. Государственными стандартами установлен следующий ряд высот оси вращения: 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 мм;

4 – условная длина сердечника якоря: «М» – первая длина, «L» – вторая длина;

5 – климатическое исполнение, «У» – электродвигатели, предназначенные для эксплуатации в районах с умеренным климатом; «ХЛ» – электродвигатели, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом;

6 – число полюсов электродвигателя.

2.4. Пример расчета

В соответствии с заданным преподавателем варианта из таблицы 2.3.1. выбираем электродвигатель постоянного тока независимого воз-

буждения типа 2ПН112МУХЛ4 со следующими номинальными данными:

– номинальная механическая мощность на валу электрического двигателя $P_{\text{ном}} = 3,6$ кВт;

– номинальное напряжение питающей сети постоянного тока $U_{\text{аном}} = 110$ В;

– номинальная частота вращения якоря электродвигателя $n_{\text{ном}} = 3150$ об./мин.;

– номинальный коэффициент полезного действия электродвигателя $\eta_{\text{ном}} = 78,5$ %;

– электрическое сопротивление обмотки якоря при температуре окружающей среды 15°C $R_a = 0,084$ Ом;

– электрическое сопротивление обмотки добавочных полюсов $R_{\text{дп}} = 0,089$ Ом;

– электрическое сопротивление обмотки возбуждения электродвигателя $R_{\text{в}} = 33,6$ Ом.

Ток, потребляемый обмоткой якоря электродвигателя постоянного тока из сети,

$$I_{\text{аном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} U_{\text{аном}}} = \frac{3,6 \times 10^3}{0,785 \times 110} = 41,69 \text{ А.}$$

Номинальный электромагнитный вращающий момент, развиваемый электродвигателем,

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \times 30}{\pi n_{\text{ном}}} = \frac{3,6 \times 10^3 \times 30}{3,14 \times 3150} = 10,92 \text{ Нм.}$$

Для электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения электромагнитный момент пропорционален току якорной обмотки. Поэтому электромагнитный пусковой момент при токе $I_{\text{ап}} = 2I_{\text{аном}}$ будет равен

$$M_{\text{п}} = 2M_{\text{ном}} = 2 \times 10,92 = 21,84 \text{ Нм.}$$

Соответствующее сопротивление пускового реостата определится из формулы

$$I_{ан} = \frac{U_{аном}}{R_a + R_{дп} + R_{п}} = 2I_{аном},$$

откуда

$$\begin{aligned} R_{п} &= \frac{U_{аном}}{2I_{аном}} - R_a - R_{дп} = \\ &= \frac{110}{2 \times 41,69} - 0,084 - 0,089 = 1,15 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Уравнение естественной механической характеристики электродвигателя имеет следующий вид

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{дп})}{C_0^2 \Phi^2} M.$$

Произведение $C_0 \Phi$ определим из уравнения равновесия напряжений якорной цепи

$$U_a = E_a + I_a (R_a + R_{дп}).$$

Подставляя выражение для электродвижущей силы якоря $E_a = C_0 \Phi \Omega$, получим

$$\begin{aligned} C_0 \Phi &= \frac{U_{аном} - (R_a + R_{дп}) I_{аном}}{\Omega_{ном}} = \\ &= \frac{110 - (0,084 + 0,089) \times 41,69}{329,7} = 0,312, \end{aligned}$$

где

$$\Omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30} =$$

$$= \frac{3,14 \times 3150}{30} = 329,7 \text{ рад./сек.}$$

Тогда уравнение естественной механической характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{дп})}{C_0^2 \Phi^2} M = \\ &= 352,6 - 1,778 M. \end{aligned}$$

Естественная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рисунке 2.4.1.

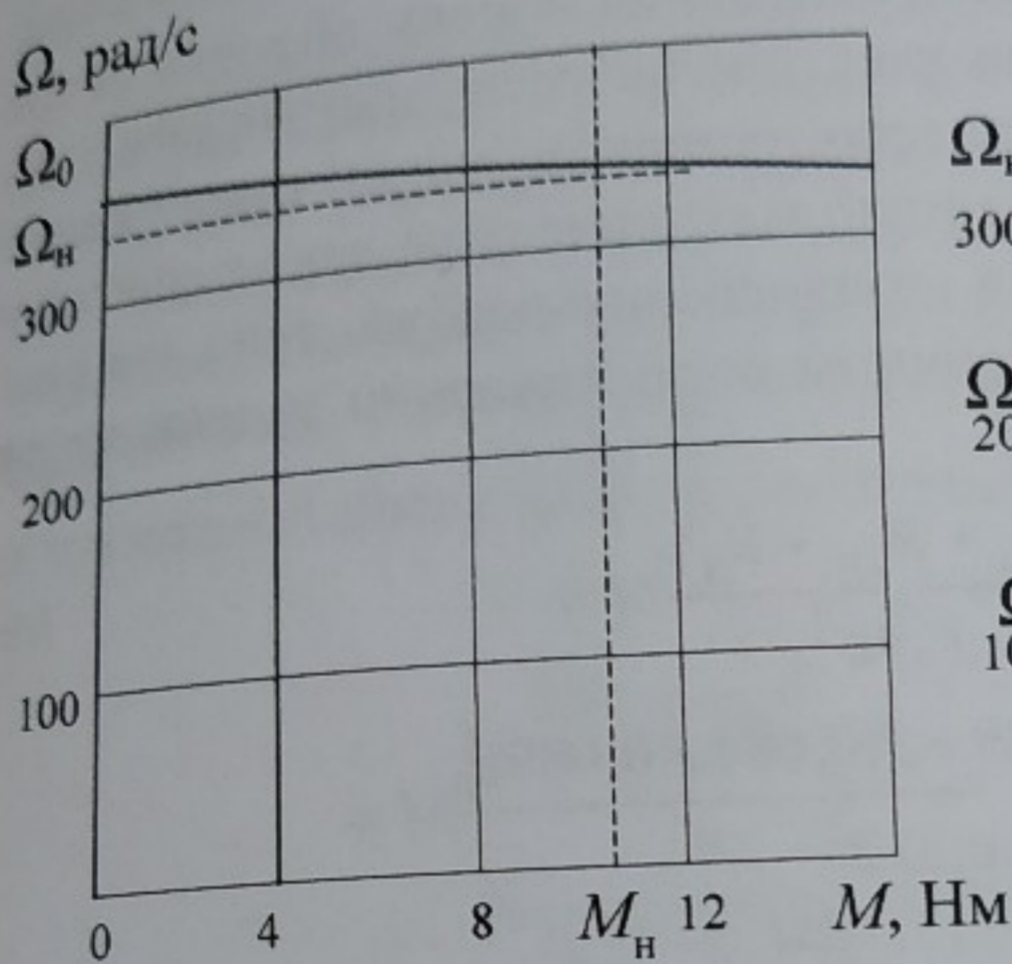


Рис. 2.4.1

Естественная механическая характеристика ДПТ

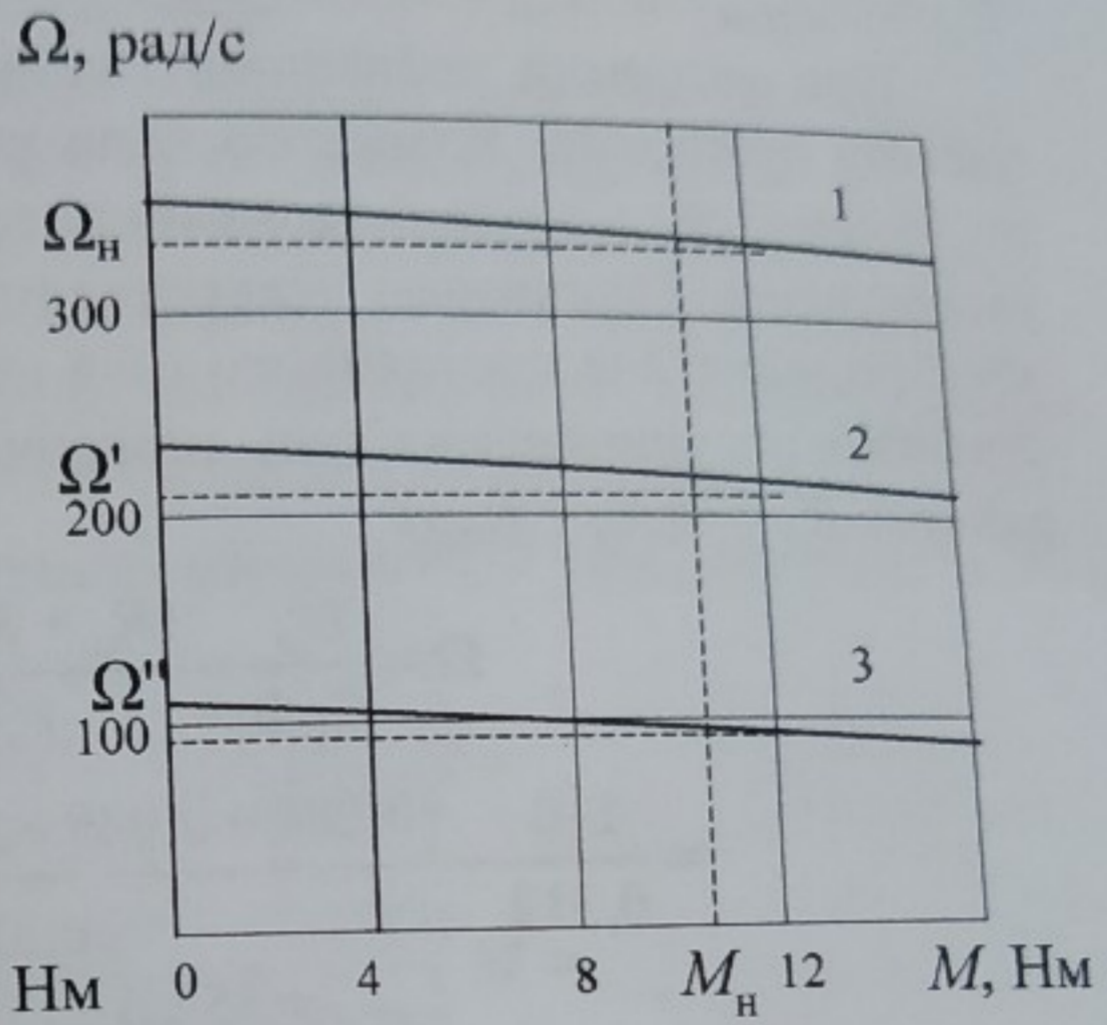


Рис. 2.4.2

Механические характеристики при якорном регулировании

При якорном регулировании электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения наклон механической характеристики не изменится, а частота вращения холостого хода будет пропорциональна напряжению, приложенному к якорной обмотке электрической машины.

Таблица 2.4.1. Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при якорном регулировании

U_a	$\frac{U_a}{U_{aном}}$	$1,00U_{aн}$	$0,67U_{aн}$	$0,33U_{aн}$
Ω_0	рад./сек.	352,8	236,4	116,4
$\Omega_{ном}$	рад./сек.	333,4	217,0	97,0

Семейство искусственных механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения при якорном регулировании представлено на рисунке 2.4.2, где кривая 1 – естественная механическая характеристика для номинального напряжения сети $U_a = U_{аном}$; 2 – $U_a = 0,67U_{аном}$; 3 – $U_a = 0,33U_{аном}$.

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря частота вращения холостого хода электродвигателя постоянного тока не изменится, а жесткость механической характеристики существенно уменьшится. Рассчитаем искусственную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения для реостатного регулирования при добавочном сопротивлении в цепи якоря равном $R_d = 9(R_a + R_{дп})$

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{дп} + R_d)}{C_0^2 \Phi^2} M = \\ &= \frac{110}{0,312} - \frac{[0,084 + 0,089 + 9(0,084 + 0,089)]}{0,312^2} M = \\ &= 352,6 - 17,78M. \end{aligned}$$

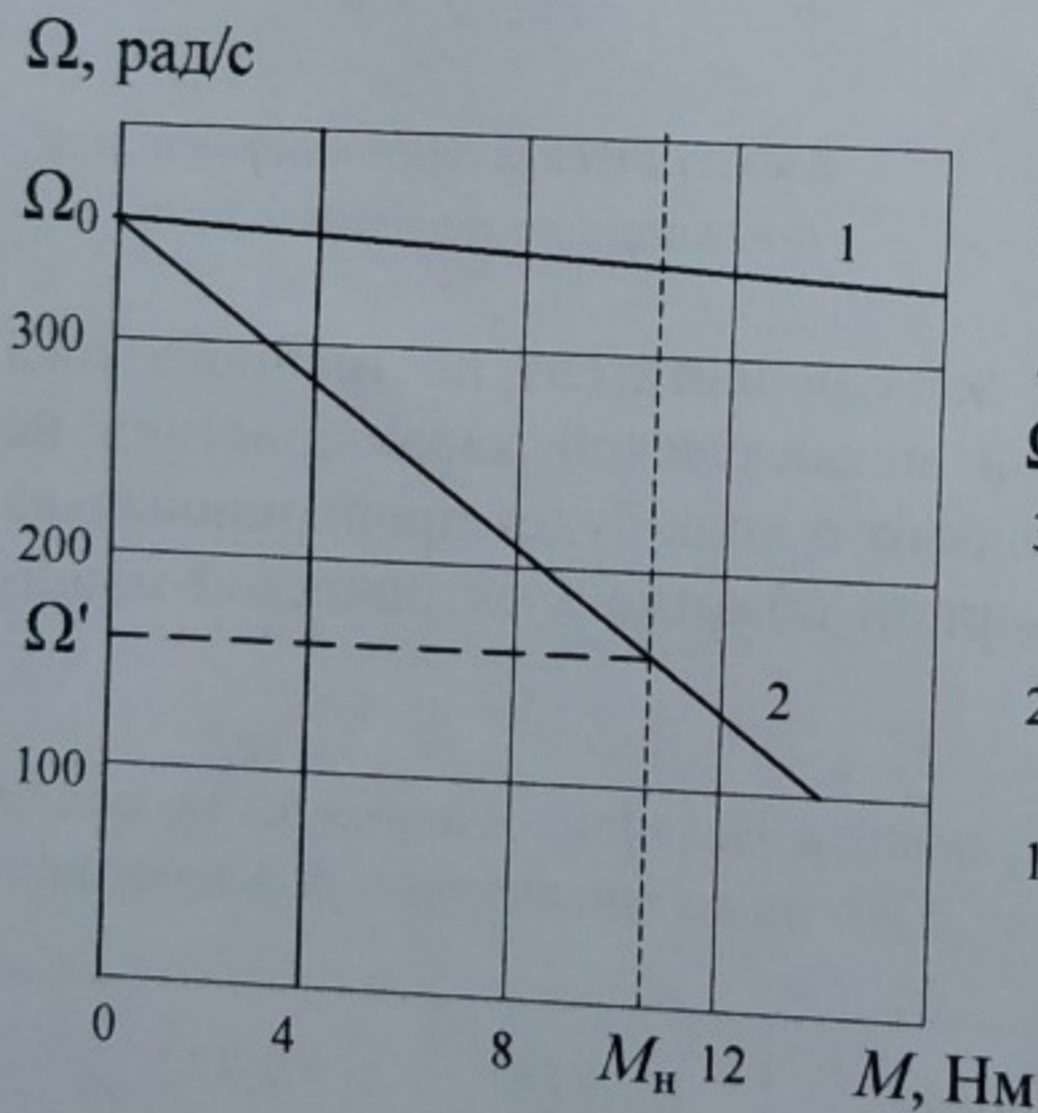


Рис. 2.4.3

Семейство механических характеристик ДПТ при реостатном регулировании

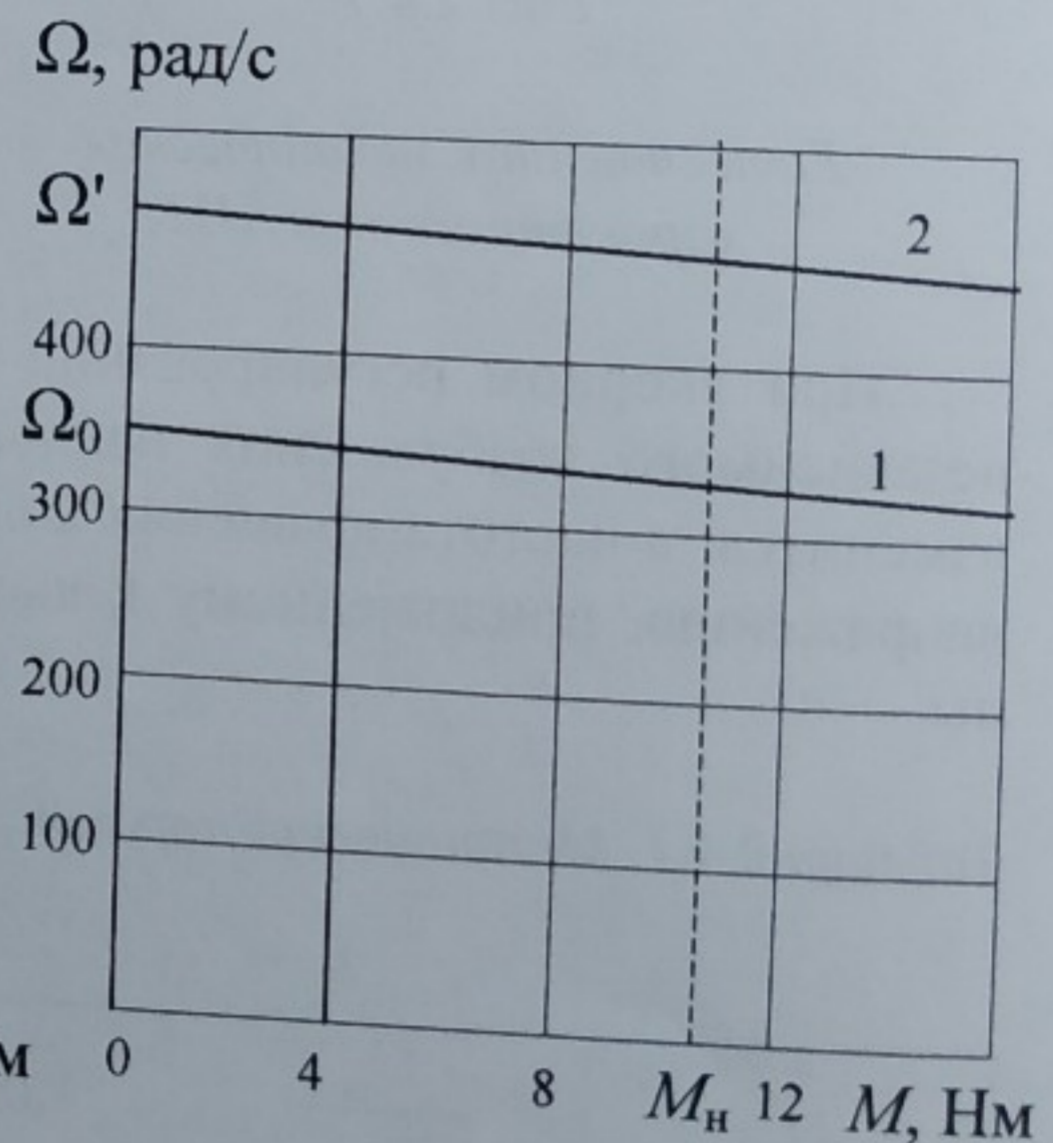


Рис. 2.4.4

Семейство механических характеристик ДПТ при полюсном регулировании

Семейство механических характеристик электродвигателя постоянного тока при реостатном регулировании его частоты вращения приведены на рисунке 2.4.3, где кривая 1 – естественная механическая характеристика двигателя; 2 – механическая характеристика при введении добавочного сопротивления $R_d = 9(R_a + R_{дп})$.

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения уменьшается ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток обмотки возбуждения машины. При ненасыщенной магнитной системе электродвигателя изменение магнитного потока возбуждения пропорционально изменению тока возбуждения. То есть при введении в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления $R_{вд} = 0,3R_B$ ток и магнитный поток возбуждения уменьшится в 0,77 раза, соответственно

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_a}{0,77C_0\Phi} - \frac{(R_a + R_{дп})}{0,77^2 C_0^2 \Phi^2} M = \\ &= \frac{110}{0,77 \times 0,312} - \frac{(0,084 + 0,089)}{(0,77 \times 0,312)^2} M = \\ &= 445,3 - 2,836M. \end{aligned}$$

Семейство механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения для полюсного регулирования представлено на рисунке 2.4.4, где кривая 1 – естественная механическая характеристика двигателя при $\Phi = \Phi_{ном}$; 2 – механическая характеристика при введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения ($\Phi = 0,77\Phi_{ном}$).

Построим механические характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения при реостатном пуске. Процесс реостатного пуска заключается в том, что при достижении определенного значения развиваемого электродвигателем электромагнитного момента часть секций пускового сопротивления шунтируется. При полностью зашунтированном пусковом реостате электродвигатель начинает работать на естественной механической характеристике и выходит на номинальный режим.

Пределы изменения момента при пуске электродвигателя определяются по следующим соображениям. Значение максимального момента при номинальном потоке электродвигателя обычно принимается по условиям коммутации равным $2 \div 2,5$. Что касается минимального момента, то его нужно принять, по крайней мере, на $10 \div 20\%$ больше момента сопротивления механизма. Для построения реостатных характе-

ристик принимаем, что момент при пуске изменяется в пределах от $2 M_{\text{ном}}$ до $1,2 M_{\text{ном}}$.

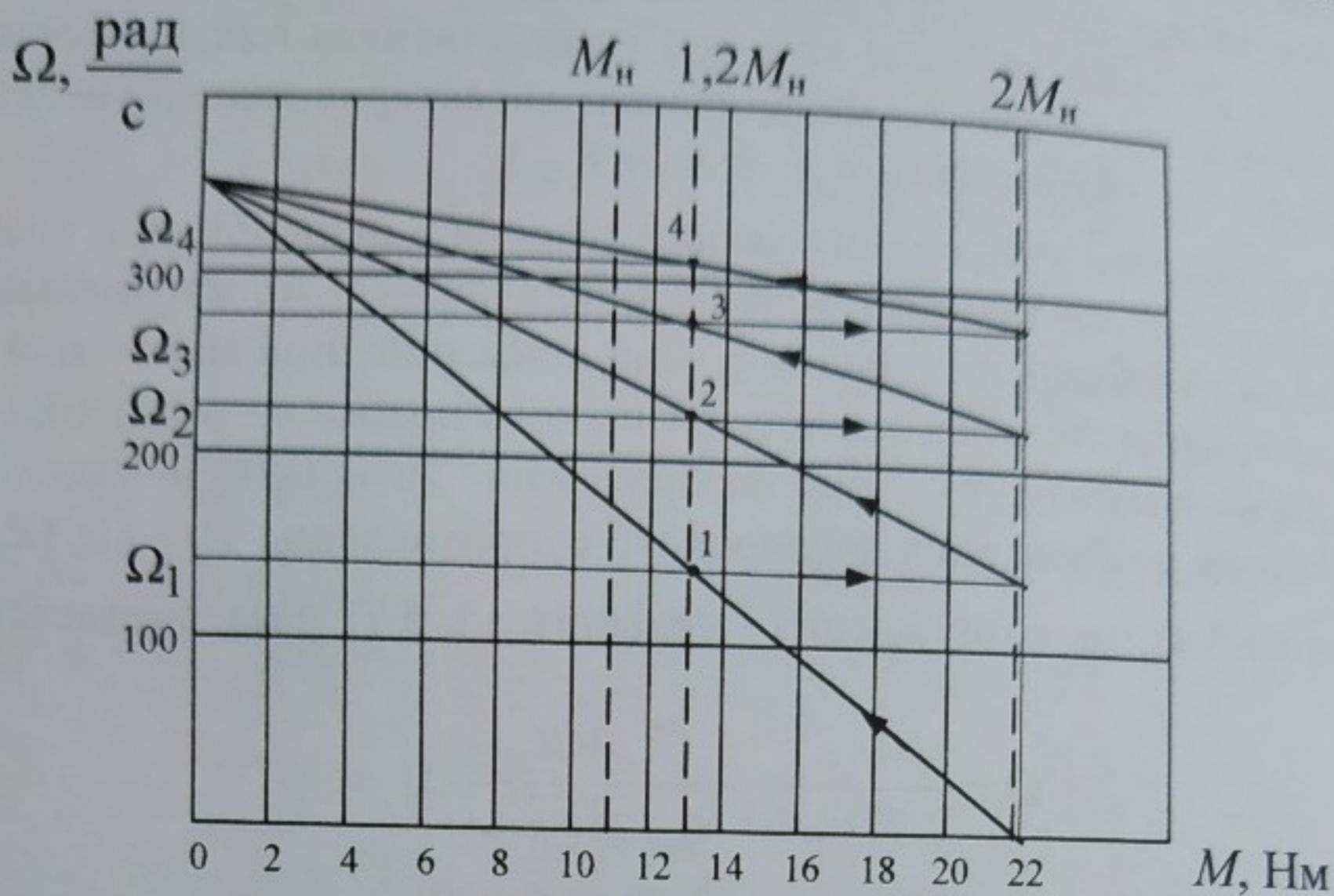


Рис. 2.4.5

Диаграмма пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Графически определяем скорости переключения секций пускового реостата при электромагнитном моменте на валу электродвигателя равном $1,2 M_{\text{ном}}$ (точки 1, 2, 3, 4 на рисунке 2.4.5):

$$\Omega_1 = 140 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_2 = 225 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_3 = 275 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_4 = 310 \text{ рад./сек.}$$

По скорости переключения определим добавочные сопротивления для всех реостатных механических характеристик электродвигателя из формулы

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{дп}} + R_{\text{д}})}{C_0^2 \Phi^2} M.$$

Для момента $M = 1,2 M_{\text{ном}}$ получаем

$$R_{\text{д}} = 2,437 - \frac{\Omega}{135,09}.$$

Заносим полученные результаты расчета в таблицу 2.4.2.

Таблица 2.4.2. Сопротивление секций пускового реостата

Ω	рад./сек.	310	275	225	140
R_d	Ом	0,142	0,401	0,771	1,401

Таким образом, выбираем секционированный пусковой реостат, состоящий из четырех секций со следующими величинами сопротивлений секций:

$$R_{d1} = 1,401 - 0,771 = 0,630 \text{ Ом};$$

$$R_{d2} = 0,771 - 0,401 = 0,370 \text{ Ом};$$

$$R_{d3} = 0,401 - 0,142 = 0,259 \text{ Ом};$$

$$R_{d4} = 0,142 \text{ Ом}.$$

Из приложения 2 выбираем пусковой реостат III габарита типа РЗП-3 со следующими параметрами:

– допустимая мощность электродвигателя – 5,0 ÷ 7,0 кВт;

– номинальное допустимое напряжение – 110 В;

– предельный допустимый ток реостата – 120 А;

– число ступеней пускового реостата – 8;

– число элементов сопротивлений пускового реостата – 8;

– вес пускового реостата – 21 кг.

Пусковые реостаты типа РЗП предназначены для управления электродвигателями постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до 19 кВт при напряжении питающей сети 110 В и мощностью до 42 кВт при напряжении питающей сети 220 или 440 В. Пусковые реостаты осуществляют пуск электродвигателя постоянного тока путем ступенчатого изменения сопротивления в цепи обмотки якоря.

Они состоят из проволочных или ленточных резистивных элементов типов СН, СНл и ЦФ. Вместе с коммутирующим устройством они расположены в металлическом корпусе с естественным воздушным охлаждением.

Пусковыми реостатами можно производить только пуск и остановку электродвигателя. Недопустима их работа в длительном режиме. Они допускают два пуска электродвигателя подряд с паузой после каждого пуска, вдвое большей, чем время пуска. На частые пуски реостаты не рассчитаны.

Схема включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рисунке 2.4.6. Здесь: M – обмотка якоря электродвигателя постоянного тока; OB – независимая обмотка возбуждения; $R_{ВД}$ – добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения, предназначенное для полюсного управления электродвигателем; $R_{Д}$ – добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря для реостатного регулирования частоты вращения; $R_{Д1}, \dots, R_{Д4}$ – секции пускового реостата; K_1, \dots, K_4 – коммутаторы.

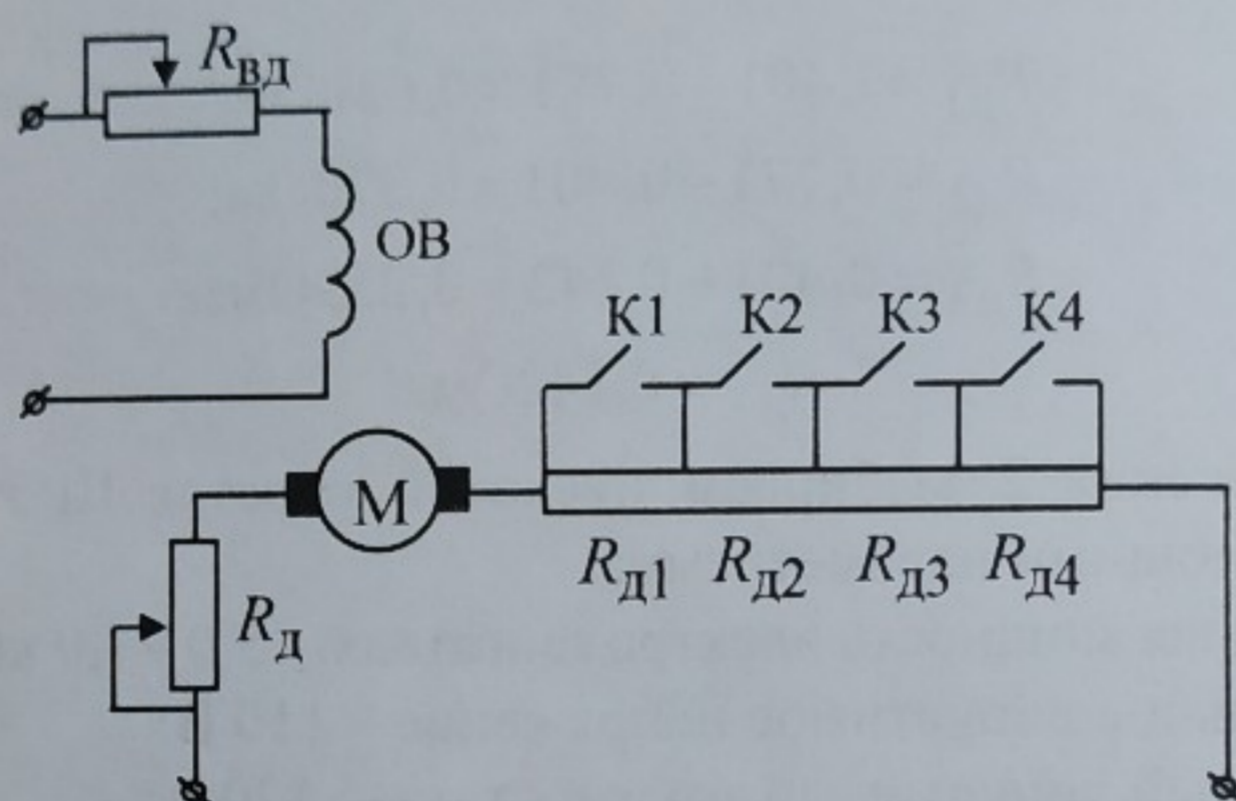


Рис. 2.4.6

Схема включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

2.5. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения»

1. В соответствии с предложенным вариантом задания из таблицы 2.6.1 выбрать электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения.
2. Определить номинальный электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя.
3. Полагая, что магнитная система электродвигателя ненасыщенна, рассчитать и построить его естественную механическую характеристику $\Omega = f(M)$.
4. Рассчитать и построить семейство искусственных механических характеристик электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения при реостатном регулировании частоты вращения для до-

Технические данные пусковых реостатов РП и РЗП

Габариты реостата	Тип реостата	Мощность электродвигателя $P_{НОМ}$, кВт			Предельный ток, А	Число ступеней	Число элементов сопротивлений	Вес, кг
		$U_H = 110$ В	$U_H = 220$ В	$U_H = 440$ В				
I	РП-2511	0,52 ÷ 2,5	0,52 ÷ 3,7	1,0 ÷ 3,7	30	4	2	5,5
II	РЗП-2	-	-	5,6				
		3,0 ÷ 3,7	4,2 ÷ 7,0	-	40	7	6	12
III	РЗП-3	5,0 ÷ 7,0	8,5 ÷ 10,5	-	120	8	8	21
III	РЗП-3А	8,5 ÷ 10,5	13,5 ÷ 15,0	13,5	120	8	16	27
IV	РЗП-4	13,5 ÷ 15,0	-	-	200	12	6	52
IV	РЗП-4А	15,0 ÷ 19,0	19,5 ÷ 21,0	-	200	12	10	55
IV	РЗП-4Б	-	30,0 ÷ 42,0	20,5 ÷ 29,0	200	12	14	60
IV	РЗП-4В	-	42,0	42,0	200	12	18	65