

## Содержание

<b>Практическая работа 1</b>	<b>2</b>
<b>Построение развёрнутой схемы обмотки якоря</b>	<b>2</b>
<b>Практическая работа 2</b>	<b>7</b>
<b>Расчет номинальных величин машин постоянного тока</b>	<b>7</b>
<b>Практическая работа 3</b>	<b>10</b>
<b>«Построение естественной и искусственной механической характеристики ДПТ НВ»</b>	<b>10</b>
<b>Практическая работа 4</b>	<b>14</b>
<b>Расчет потерь и построение рабочих характеристик для ДПТ</b>	<b>15</b>
<b>Практическая работа 5</b>	<b>19</b>
<b>«Построение механических характеристик ДПТНВ для различных режимов работы. Расчёт тормозных резисторов»</b>	<b>19</b>
<b>Практическая работа 6</b>	<b>23</b>
<b>«Расчет пусковых резисторов для двигателей постоянного тока»</b>	<b>24</b>

## Практическая работа 1

### Построение развёрнутой схемы обмотки якоря

По данным, приведённым в таблице 1, рассчитать параметры и начертить развёрнутую схему простой волновой (ПВ) или простой петлевой (ПП) обмотки якоря.

На схеме расставить щётки и обозначить полюса. Секции одновитковые.

Таблица 1 – Данные для выполнения практической работы 1

Вариант	Число пазов $Z_n$	Число полюсов $2p$	Тип обмотки	Вариант	Число пазов $Z_n$	Число полюсов $2p$	Тип обмотки
1	20	4	ПП	16	32	4	ПП
2	25	6	ПВ	17	22	6	ПП
3	14	2	ПП	18	21	4	ПВ
4	15	2	ПВ	19	17	2	ПВ
5	23	4	ПВ	20	26	6	ПП
6	24	8	ПП	21	31	8	ПВ
7	18	4	ПП	22	34	6	ПП
8	13	2	ПВ	23	29	6	ПВ
9	27	4	ПВ	24	18	2	ПП
10	28	6	ПП	25	15	4	ПВ
11	19	6	ПВ	26	25	4	ПВ
12	16	6	ПП	27	20	6	ПП
13	29	4	ПВ	28	24	4	ПП
14	30	6	ПП	29	19	4	ПП
15	33	8	ПВ	30	33	6	ПВ

#### *Пример 1 Порядок построения простой петлевой обмотки*

Построить развёрнутую схему простой петлевой обмотки, если  $Z_n = 12$ ;  $2p = 4$ .

1. Вычислить количество проводников и шаги обмотки.

$$N = 2Z_n w_c = 2 \cdot 12 \cdot 1 = 24; \quad y_1 = \frac{Z_n}{2p} = \frac{12}{4} = 3; \quad y_k = y = 1; \quad y_2 = y_1 - y = 3 - 1 = 2$$

2. Начертить коллекторные пластины и проводники обмотки (рисунок 1.1).

3. Начертить одну секцию обмотки, расположить её и пронумеровать коллекторные пластины и пазы обмотки (рисунок 1.2).

Паза, в которых располагаются начало, и конец одной секции определяются следующим образом:

- начало секции – номер паза  $N_{нн}$  и номер коллекторной пластины  $N_{кн}$  совпадают.

- конец секции – номер паза определяется по формуле:

$$N_{нк} = y_1 + N_{нн} = 3 + 1 = 4,$$

номер коллекторной пластины по формуле:

$$N_{кк} = y_k + N_{кн} = 1 + 1 = 2$$

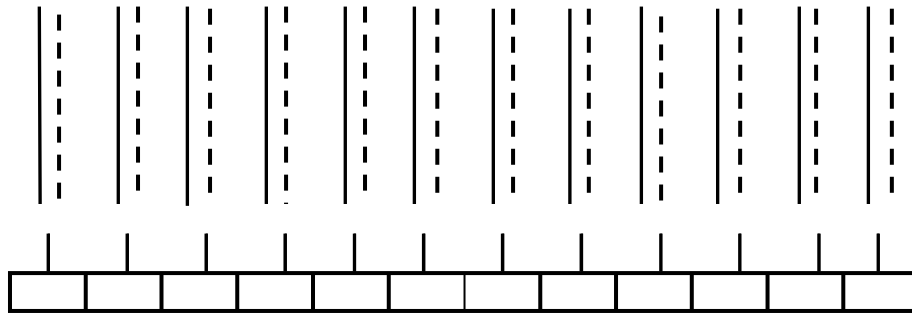


Рис. 1.1

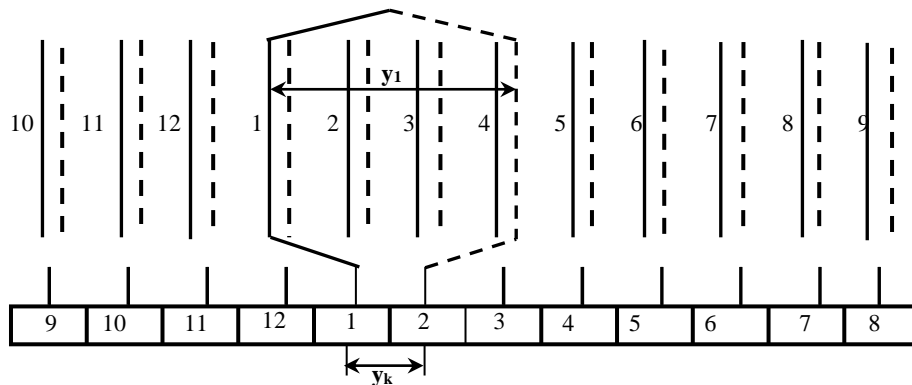


Рис. 1.2

4. Начертить вторую секцию обмотки. Расположить её на якоре так, чтобы начало второй секции присоединялось к концу первой (рисунок 1.3).

5. Аналогично расположить оставшиеся секции обмотки, так чтобы конец последней секции соединился с началом первой. Количество секций должно равняться количеству коллекторных пластин. Соединение проводников ведётся по схеме:

$1_k \rightarrow 1_{п^H} \rightarrow 4_{п^K} \rightarrow 2_k \rightarrow 2_{п^H} \rightarrow 5_{п^K} \rightarrow 3_k \rightarrow 3_{п^H} \rightarrow 6_{п^K} \rightarrow 4_k \rightarrow 4_{п^H} \rightarrow 7_{п^K} \rightarrow 5_k \rightarrow 5_{п^H} \rightarrow 8_{п^K} \rightarrow 6_k \rightarrow 6_{п^H} \rightarrow 9_{п^K} \rightarrow 7_k \rightarrow 7_{п^H} \rightarrow 10_{п^K} \rightarrow 8_k \rightarrow 8_{п^H} \rightarrow 11_{п^K} \rightarrow 9_k \rightarrow 9_{п^H} \rightarrow 12_{п^K} \rightarrow 10_k \rightarrow 10_{п^H} \rightarrow 1_{п^K} \rightarrow 11_k \rightarrow 11_{п^H} \rightarrow 2_{п^K} \rightarrow 12_k \rightarrow 12_{п^H} \rightarrow 3_{п^K} \rightarrow 1_k$

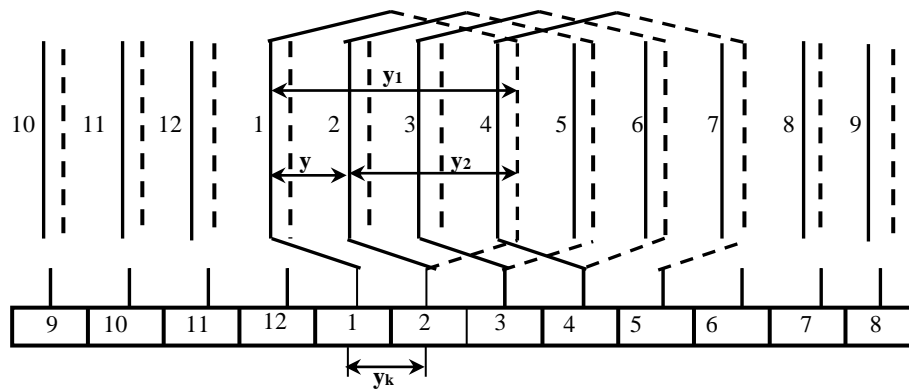


Рис. 1.3

6. Расположить на обмотке полюса. По центру каждого полюса начертить щётки. Щётки одной полярности соединить между собой (рисунок 1.4).

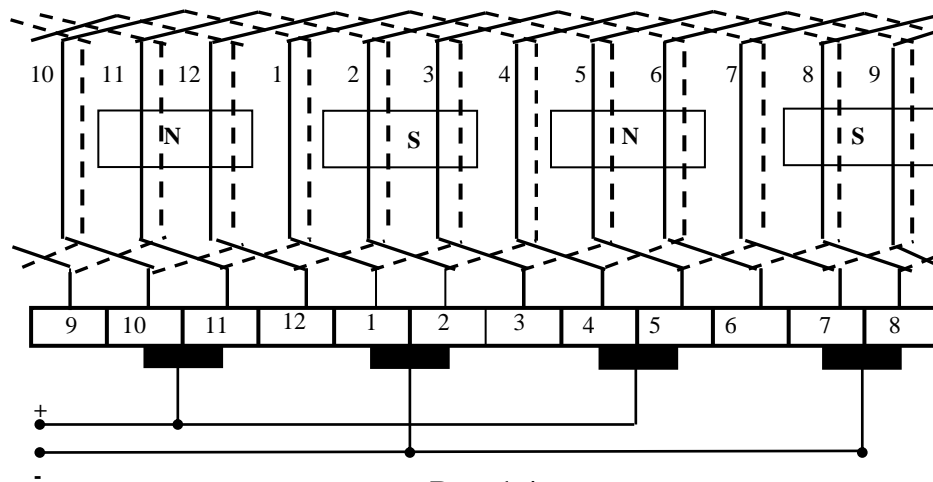


Рис. 1.4

### **Пример 2 Порядок построения простой волновой обмотки**

Построить развёрнутую схему простой петлевой обмотки, если  $Z_n = 11$ ;  $2p = 4$ .

1. Вычислить количество проводников и шаги обмотки.

$$N = 2Z_n w_c = 2 \cdot 12 \cdot 1 = 24; \quad y_1 = \frac{Z_n}{2p} = \frac{11}{4} = 3; \quad y_k = y = \frac{K+1}{p} = \frac{11+1}{2} = 6;$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

2. Начертить коллекторные пластины и проводники обмотки (рисунок 1.1).

3. Начертить одну секцию обмотки, расположить её и пронумеровать коллекторные пластины и пазы обмотки (рисунок 1.5).

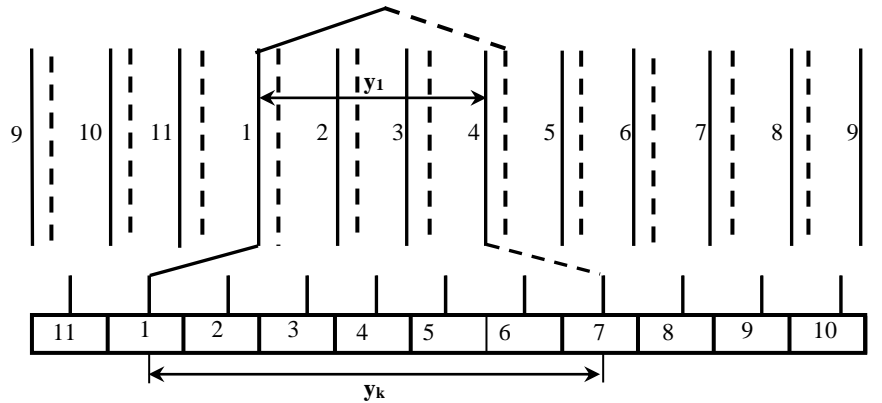


Рис. 1.5

Пазы, в которых располагаются начало, и конец одной секции определяются следующим образом:

- начало секции – номер пазы  $N_{nh}$  и номер коллекторной пластины  $N_{kh}$  совпадают.

- конец секции – номер пазы определяется по формуле:

$$N_{nk} = y_1 + N_{nh} = 3 + 1 = 4,$$

- номер коллекторной пластины по формуле:

$$N_{kk} = y_k + N_{kh} = 1 + 6 = 7$$

4. Начертить вторую секцию обмотки. Расположить её на якоре так, чтобы начало второй секции присоединялось к концу первой. За один обход укладывается столько секций, сколько пар полюсов (рисунок 1.6).

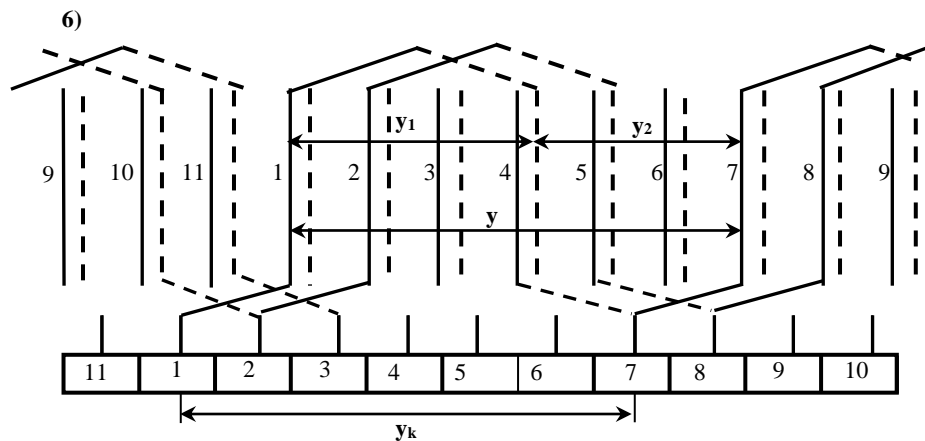
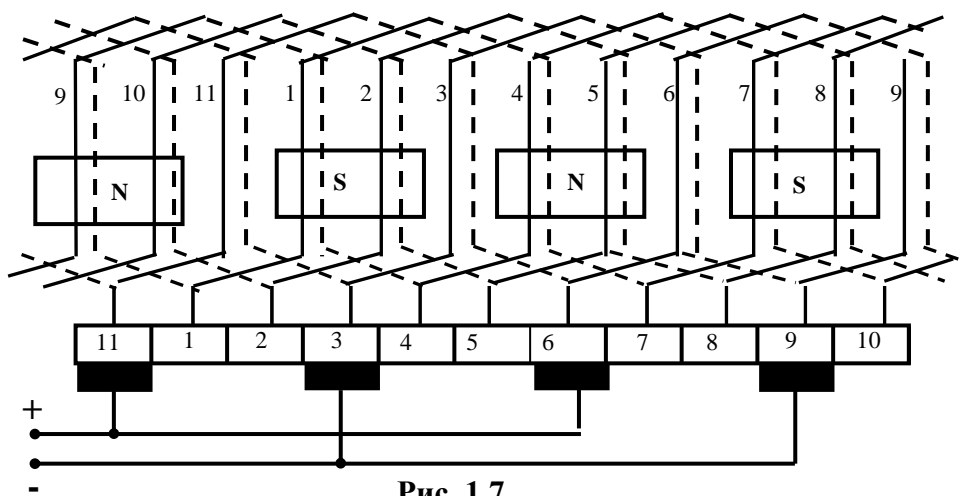


Рис. 1.6

5. Аналогично расположить оставшиеся секции обмотки, так чтобы конец последней секции соединился с началом первой. Количество секций должно равняться количеству коллекторных пластин. Соединение проводников ведётся по схеме:

$1_k \rightarrow 1_{\pi}^H \rightarrow 4_{\pi}^K \rightarrow 7_k \rightarrow 7_{\pi}^H \rightarrow 10_{\pi}^K \rightarrow 2_k \rightarrow 2_{\pi}^H \rightarrow 5_{\pi}^K \rightarrow 8_k \rightarrow 8_{\pi}^H \rightarrow 11_{\pi}^K \rightarrow 3_k \rightarrow 3_{\pi}^H \rightarrow 6_{\pi}^K \rightarrow 9_k \rightarrow 9_{\pi}^H \rightarrow$   
 $12_{\pi}^K \rightarrow 4_k \rightarrow 4_{\pi}^H \rightarrow 7_{\pi}^K \rightarrow 10_k \rightarrow 10_{\pi}^H \rightarrow 1_{\pi}^K \rightarrow 5_k \rightarrow 5_{\pi}^H \rightarrow 8_{\pi}^K \rightarrow 11_k \rightarrow 11_{\pi}^H \rightarrow 3_{\pi}^K \rightarrow 6_k \rightarrow 6_{\pi}^H \rightarrow 9_{\pi}^K \rightarrow$   
 $1_k$

6. Расположить на обмотке полюса. По центру каждого полюса начертить щётки. Щётки одной полярности соединить между собой (рисунок 1.7).



## Практическая работа 2

### Расчет номинальных величин машин постоянного тока

#### Цель работы:

Научиться по паспортным данным машины постоянного тока определять её номинальные данные

#### Формулы для расчета

Уравнения напряжения

двигательный режим

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E_{\text{я}}$$

генераторный режим

$$U_{\text{я}} = -I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E_{\text{я}}$$

ЭДС обмотки якоря

$$E_{\text{я}} = \kappa \Phi \omega$$

Электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = \kappa \Phi I_{\text{я}}$$

Конструктивный коэффициент машины

$$k = \frac{pN}{2\pi a}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

Номинальная мощность

двигательный режим

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{эм}} \omega$$

генераторный режим

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

#### Задание для расчета

По данным, приведенным в таблице 2, рассчитать номинальные величины для двигателя постоянного тока (ДПТ) или генератора постоянного тока (ГПТ) при условии, что потери равны нулю

Параметры и типы обмоток якоря взять из таблицы 1.

Таблица 2 – Данные для выполнения практической работы 2

Вариант	1	5	10	15	20	25	Определить
$U_{\text{я}}, \text{В}$	230	230	460	460	460	115	ЭДС; Ток якоря; Полезную мощность Электромагнитную мощность; Электромагнитный момент
$n, \text{об/мин}$	1500	2300	3000	2300	1500	1000	
$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	0,175	0,08	0,17	0,3	0,7	0,09	
$\Phi \cdot 10^{-2}, \text{Вб}$	4,8	2,6	1,7	2,6	4,8	4,5	
Тип машины	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	
Вариант	2	7	12	17	22	27	Определить
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	55	75	100	125	200	42	ЭДС; Сопротивление обмотки якоря; Магнитный поток; Элек-
$U_{\text{я}}, \text{В}$	220	220	220	220	220	110	
$I_{\text{я}}, \text{А}$	289	382	503	630	1020	439	
$n, \text{об/мин}$	1220	1500	1200	1000	1500	2240	

Тип машины	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	электромагнитную мощность; Электромагнитный момент
Вариант	3	8	13	18	23	28	Определить
$P_{ном}, кВт$	55	70	40	25	35	50	ЭДС; Ток якоря; Частоту вращения; Электромагнитную мощность; Электромагнитный момент
$U_{я}, В$	230	115	230	115	115	230	
$R_{я}, Ом$	0,04	0,01	0,05	0,06	0,04	0,07	
$\Phi \cdot 10^{-2}, Вб$	2,6	4,8	4,5	2,4	2,2	2,6	
Тип машины	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	электромагнитный момент
Вариант	4	9	14	19	24	29	Определить
$P_{эм}, кВт$	6,41	8,56	14,56	18,84	7,58	10,38	Полезную мощность Ток якоря Номинальное напряжение Сопротивление якоря Магнитный поток
$E, В$	117,6	209,4	228,9	207,3	234,5	207,5	
$M_{эм}, Нм$	76,4	81,08	89,1	80,9	90,4	105	
$n, об/мин$	750	1060	1500	2360	750	1000	
Тип машины	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	Магнитный поток
Вариант	6	11	16	21	26	31	Определить
$M_{эм}, Нм$	955	1019	2105	637	535	210	Полезную мощность; ЭДС; Номинальное напряжение; Магнитный поток; Электромагнитную мощность
$I_{я}, А$	388	808	674	511	448	65	
$n, об/мин$	750	1500	750	1500	750	500	
$R_{я}, Ом$	0,024	0,006	0,1	0,013	0,012	0,289	
Тип машины	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	ГПТ	ДПТ	Электромагнитная мощность

### Пример 1

$\Phi \cdot 10^{-2}, Вб$	$R_{я}, Ом$	$U_{я}, В$	$n, об/мин$	Тип машины
6,1	35	230	1000	ДПТ
Параметры обмотки якоря: Обмотка ПП; $2p = 4$ ; $Z_n = 22$ ; $2p = 2a = 4$ ; $N = 2Z_n w_s = 2 \cdot 22 \cdot 1 = 44$				
Определить: ЭДС; Ток якоря; Полезную мощность; Электромагнитную мощность;				Электромагнитный момент

1. Определить ЭДС обмотки якоря:

$$E_{я} = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n = \frac{2 \cdot 44}{60 \cdot 2} \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 44,7 В$$

2. Определить ток якоря:

$$I_{я} = \frac{U_{я} - E}{R} = \frac{230 - 44,7}{35} = 5,29 А$$

3. Определить электромагнитный момент:



$$M_{эм} = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_{я} = \frac{2 \cdot 44}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 5,29 = 2,26 \text{ Нм}$$

4. Определить электромагнитную мощность:

$$P_{эм} = E_{я} \cdot I_{я} = 44,7 \cdot 5,29 = 236,46 \text{ Вт}$$

5. Определить полезную мощность:

$$P_{ном} = M_{эм} \cdot \omega = 2,26 \cdot 1000 \cdot 104,6 = 237,3 \text{ Вт}$$

### Пример 2

$\Phi \cdot 10^2, \text{ Вб}$	$R_{я}, \text{ Ом}$	$U_{я}, \text{ В}$	$P_{ном}, \text{ кВт}$	Тип машины
2,6	0,04	230	55	ГПТ
Параметры обмотки якоря: Обмотка ПВ; $2p = 4$ ; $Z_n = 22$ $2a = 2$ ; $N = 2Z_n w_s = 2 \cdot 22 \cdot 1 = 44$				
Определить: ЭДС; Ток якоря; Частоту вращения; Электромагнитную мощность;				Элек- тромагнитный момент

1. Определить ЭДС обмотки якоря:

$$E_{я} = U_{я} - I_{я} \cdot R_{я} = 230 + 239,1 \cdot 0,04 = 239,5 \text{ В}$$

2. Определить ток якоря:

$$I_{я} = \frac{P_{ном}}{U_{я}} = \frac{55 \cdot 1000}{230} = 239,1 \text{ А}$$

3. Определить электромагнитный момент:

$$M_{эм} = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_{я} = \frac{2 \cdot 44}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 239,1 = 87,1 \text{ Нм}$$

4. Определить электромагнитную мощность:

$$P_{эм} = E_{я} \cdot I_{я} = 239,5 \cdot 239,1 = 57,2 \text{ кВт}$$

5. Определить частоту вращения:

$$n = \frac{E_{я} \cdot 60 \cdot a}{\Phi \cdot N \cdot p} = \frac{239,5 \cdot 60 \cdot 1}{2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 44 \cdot 2} = 6280 \text{ об/мин}$$

### Практическая работа 3

#### «Построение естественной и искусственной механической характеристики ДПТНВ»

##### **Цель работы:**

1. Научиться рассчитывать параметры для построения естественной механической характеристики ДПТНВ.
2. Научиться определять координаты основных точек механической характеристики ДПТНВ при изменении параметров двигателя.

##### **Необходимо используя паспортные данные двигателя:**

##### **1. Определить координаты основных точек механической характеристики**

- соответствующие паспортным данным;
- если величина питающего напряжения составляет 30% от номинального;
- если в цепь обмотки якоря включено добавочное сопротивление, величина которого в два раза больше сопротивления обмотки якоря;
- если величина магнитного потока уменьшилась на 40% от номинального;

##### **2. Построить механические характеристики в одной координатной плоскости.**

##### **Формулы для расчета**

Уравнение напряжения

$$U = IR_{\text{я}} + E_{\text{я}}$$

ЭДС обмотки якоря

$$E_{\text{я}} = k\Phi\omega$$

Подводимая мощность:

$$P_{\text{дог}} = UI$$

Номинальная (полезная) мощность:

$$P_{2\text{ог}} = P_{\text{ном.дог}} = M_{\text{ном}}\omega$$

Угловая скорость

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

КПД

$$\eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1}$$

Сопротивление обмотки якоря

$$R_{\text{я}} = \frac{0,5 \cdot U_{\text{ном}} \cdot (1 - \eta_{\text{ном}})}{I_{\text{ном}}},$$

Уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{\text{д}}}{(k\Phi)^2},$$

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$$

Изменение угловой скорости

$$\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$$

**Данные для расчёта:**

Исходными величинами для построения механических характеристик двигателя постоянного тока являются паспортные данные двигателя/

Данные для расчета приведены в таблице 3

Таблица 3 – Паспортные данные двигателя для выполнения практической работы 3

Вариант	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$
1	55	220	1220	87
2	75	220	1500	89,5
3	10	220	1200	89,5
4	125	220	1000	90
5	200	220	1500	91
6	42	110	2240	88
7	32	110	1060	86
8	25	110	1600	86
9	75	440	3000	89,5
10	15	440	750	83
11	6	110	750	83,5
12	8	110	1000	86
13	11	220	500	80
14	14	220	500	83
15	19	220	600	81,5
16	25	110	750	83,5
17	32	110	1000	84,5
18	55	220	1500	87
19	75	220	750	88
20	100	220	750	89,6
21	1,5	220	1500	78,5
22	13,5	220	1060	84
23	42	110	750	85,3
24	6	220	1500	82,5
25	8	220	1500	84,5
26	11	110	1500	84
27	25	220	1500	82,5
28	19	220	750	84,7
29	12	220	1500	85,2
30	3,2	220	685	79

**Пример расчета:**

Для ДПТ НВ рассчитать параметры и построить естественную и искусственную механические характеристики.

Двигатель имеет следующие номинальные данные:

номинальная мощность	$P_n = 16 \text{кВт}$	сопротивление обмоток якоря	$R_{\text{я}} = 0,177 \text{Ом}$
номинальное напряжение	$U_n = 220 \text{В}$	добавочное сопротивление	$R_{\text{доб}} = 0,2 \text{Ом}$
номинальный ток	$I_n = 85 \text{А}$	напряжение $U_1$	$U_1 = 0,5 U_n \text{В}$
номинальная угловая скорость	$\omega_n = 74,5 \text{рад/с}$	магнитный поток $\kappa \Phi_1$	$\kappa \Phi_1 = 0,5(\kappa \Phi_n)$ .

**Порядок построения естественной механической характеристики.**

1. Определить номинальное значение магнитного потока:

$$\kappa \Phi_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_{\text{я}}}{\omega_n}, \quad \kappa \Phi_n = \frac{220 - 85 \cdot 0,177}{74,5} = 2,75.$$

2. Определить величину номинального момента на валу двигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} [\text{Нм}], \quad M_n = \frac{16 \cdot 10^3}{74,5} = 214,7 [\text{Нм}].$$

3. Определить угловую скорость холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{\kappa \Phi_n} \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \quad \omega_0 = \frac{220}{2,75} = 80 \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

4. Построить естественную механическую характеристику по двум точкам:

- точка холостого хода  $\omega = \omega_0 = 80 \text{рад/с}; M = 0$ ;
- точка номинального режима работы  $\omega = \omega_n = 74,5 \text{рад/с}; M = M_n = 214,7 \text{Нм}$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 3.1, график 1.

**Порядок построения искусственных механических характеристик.**

**а) Механическая характеристика при изменении напряжения.**

1. Определить величину регулируемого напряжения:

$$U_1 = 0,5 U_n = 0,5 \cdot 220 = 110 \text{В}.$$

2. Определить величину угловой скорости холостого хода при регулируемом напряжении:

$$\omega_{01} = \frac{U_1}{\kappa \Phi_n} \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \quad \omega_{01} = \frac{110}{2,75} = 40 \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

3. Определить угловую скорость, при регулировании напряжения в точке номинального режима:

$$\omega_1 = \frac{U_1}{\kappa \Phi_n} - \frac{M_n \cdot R_{\text{я}}}{(\kappa \Phi_n)^2} \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \quad \omega_1 = \frac{110}{2,75} - \frac{214,7 \cdot 0,177}{2,75^2} = 34 \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

4. Построить искусственную механическую характеристику:

- точка холостого хода  $\omega_{01} = 40 \text{рад/с}; M = 0$ ;
- точка номинального режима работы  $\omega_1 = 34 \text{рад/с}; M = M_n = 214,7 \text{Нм}$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 3.1, график 2.

**б) Механическая характеристика, при изменении сопротивления якоря.**

1. Определить угловую скорость, при включении в цепь якоря добавочного сопротивления в точке номинального режима:

$$\omega_2 = \frac{U_n}{\kappa\Phi_n} - \frac{M_n \cdot (R_a + R_{доб})}{(\kappa\Phi_n)^2} \left[ \frac{рад}{с} \right], \quad \omega_2 = \frac{220}{2,75} - \frac{214,7 \cdot (0,177 + 0,2)}{2,75^2} = 69 \left[ \frac{рад}{с} \right].$$

2. Угловая частота вращения в режиме холостого хода, при введении в цепь якоря добавочного сопротивления, остается неизменной.

3. Построить искусственную механическую характеристику:

- точка холостого хода  $\omega_2 = \omega_0 = 80 рад/с$ ;  $M = 0$ ;

- точка номинального режима работы  $\omega_2 = 69 рад/с$ ;  $M = M_n = 214,7 Нм$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 3.1, график 3.

**в) Механическая характеристика при изменении магнитного потока.**

Магнитный поток напрямую зависит от тока возбуждения двигателя, поэтому, изменяя ток возбуждения, изменяем и магнитный поток.

1. Определить величину регулируемого магнитного потока:

$$\kappa\Phi_1 = 0,5(\kappa\Phi_n) = 0,5 \cdot 2,75 = 1,375.$$

2. Определить величину угловой скорости холостого хода при регулируемом магнитном потоке:

$$\omega_{03} = \frac{U_n}{\kappa\Phi_1} \left[ \frac{рад}{с} \right], \quad \omega_{03} = \frac{220}{1,375} = 160 \left[ \frac{рад}{с} \right].$$

3. Определить угловую скорость, при регулировании магнитного потока в точке номинального режима:

$$\omega_3 = \frac{U_n}{\kappa\Phi_1} - \frac{M_n \cdot R_a}{(\kappa\Phi_1)^2} \left[ \frac{рад}{с} \right], \quad \omega_3 = \frac{220}{1,375} - \frac{214,7 \cdot 0,177}{1,375^2} = 140 \left[ \frac{рад}{с} \right].$$

4. Построить искусственную механическую характеристику:

- точка холостого хода  $\omega_3 = 160 рад/с$ ;  $M = 0$ ;

- точка номинального режима работы  $\omega_3 = 140 рад/с$ ;  $M = M_n = 214,7 Нм$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 3.1, график 4.

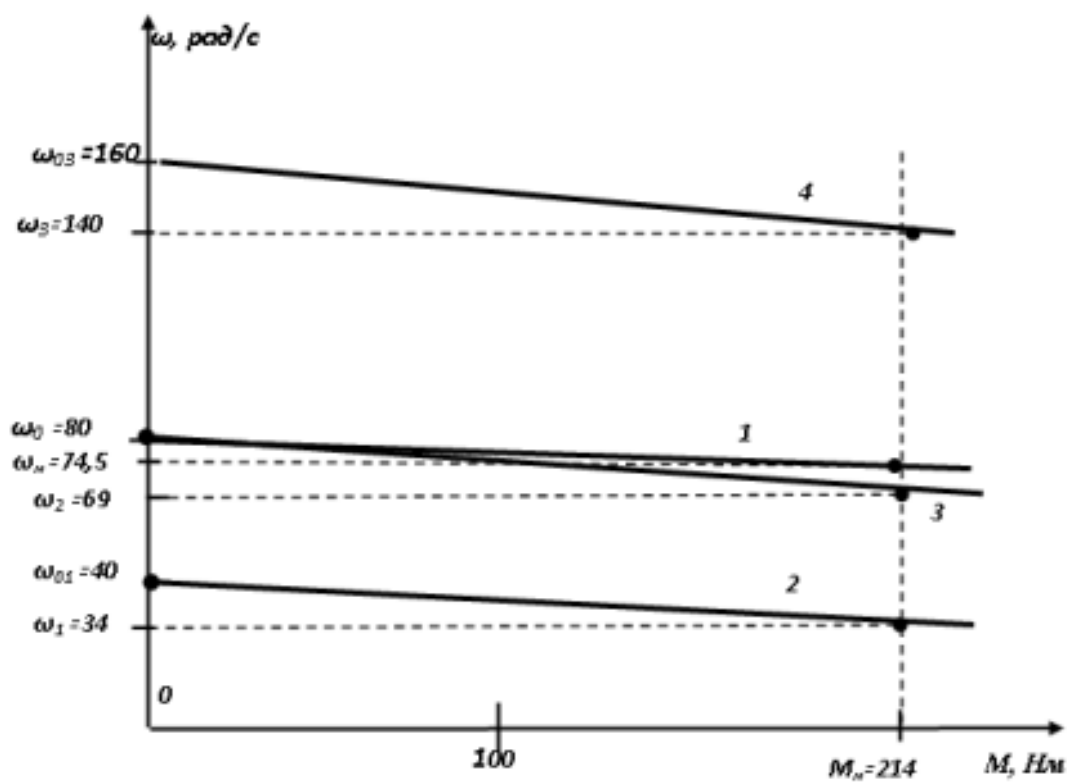


Рис. 3.1

## Практическая работа 4

### Расчет потерь и построение рабочих характеристик для ДПТ

#### Цель работы:

Научиться:

- определять потери в МПТ;
- строить рабочие характеристики для двигателей постоянного тока.

#### Необходимо:

1. Определить величину номинальных потерь двигателя.
2. Построить рабочие характеристики двигателя, при условии, что мощность на выходе двигателя изменяется от 0 до номинального значения.

#### Формулы для расчета

Номинальный ток двигателя:

$$I_{ном} = I_{я} + \frac{U_{ном}}{R_{\epsilon}}$$

Номинальная мощность двигателя:

$$P_{ном} = M_{ном} \omega_{ном}$$

Входная мощность двигателя:

$$P_1 = U_{ном} I_{ном} = P_{ном} + \sum \Delta P$$

ЭДС обмотки якоря

$$E_{я} = \kappa \Phi \omega_{ном}$$

Электромагнитный момент

$$M_2 = \kappa \Phi I_z$$

Сумма потерь:

$$\sum \Delta P = P_{xx} + \Delta P_{\epsilon я}$$

Электрические потери в обмотке якоря:

$$\Delta P_{\epsilon я} = I_{я}^2 R_{я}$$

КПД двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

#### Задание для расчета

По данным, приведенным в таблице 4, рассчитать потери и построить рабочие характеристики для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Таблица 4 - Данные для выполнения практической работы 4

Вариант	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , В	$n_{ном}$ , об/мин	$\eta_{ном}$ , %	$R_{я}$ , Ом	$R_{в}$ , Ом
1	22	220	1500	87,5	0,047	64
2	0,25	110	1060	56	3,99	610
3	0,37	220	1500	61,5	10,61	612
4	0,71	220	2360	70	3,99	123
5	1	110	3000	71,5	0,6	365
6	0,37	110	750	60	2,69	470
7	0,5	220	1000	66	7,05	120
8	0,75	110	1500	71	0,805	359

9	1,2	220	2200	76,5	1,792	103
10	2	110	3000	78,5	0,201	265
11	0,6	220	800	60,5	5,07	61,4
12	0,85	110	1060	63	0,788	233
13	1,5	220	1500	70	1,77	44
14	2,5	220	2200	76	0,788	39,4
15	3,6	110	3150	78,5	0,084	129
16	1,6	110	750	68	0,472	134
17	2,5	110	1000	72	0,271	134
18	4	440	1500	79	2,28	134
19	7	220	2240	83	0,226	25,6
20	10,5	220	3000	84	0,14	111
21	3	440	750	76	3,15	108
22	4,5	220	1000	79,5	0,411	26,8
23	7,5	110	1600	83	0,037	82
24	13	220	2120	85,5	0,081	61,5
25	18	220	3150	87	0,037	53,1
26	5,6	440	750	79,5	1,5	74,8
27	8	220	1060	83	0,181	23
28	15	220	1500	85,5	0,084	55,5
29	26	440	3000	89	0,15	12,8
30	37	440	3150	79,5	0,084	64

**Пример расчёта.**

Дано:

$P_{\text{НОМ}} = 0,17 \text{ кВт};$	$\eta_{\text{НОМ}} = 48,5 \ %;$	$R_{\text{я}} = 27,2 \text{ Ом};$
$U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В};$	$n_{\text{НОМ}} = 750 \text{ об/мин};$	$R_{\text{в}} = 162 \text{ Ом}.$

1. Определить номинальный ток двигателя,  $I_{\text{НОМ}}$ , А:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 1000}{U_{\text{НОМ}} \cdot \eta} = \frac{0,17 \cdot 1000}{220 \cdot 0,485} = 1,59$$

2. Определить ток обмотки якоря,  $I_{\text{я}}$ , А:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{НОМ}} - \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{в}}} = 1,59 - \frac{220}{162} = 0,24$$

3. Определить электрические потери в обмотке якоря,  $\Delta P_{\text{эя}}$ , Вт:

$$\Delta P_{\text{эя}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}} = 0,24^2 \cdot 27,2 = 1,57$$

4. Определить номинальные потери двигателя,  $\Sigma \Delta P_{\text{НОМ}}$ , Вт:

$$\Sigma \Delta P_{\text{НОМ}} = P_1 - P_{\text{НОМ}} = 220 \cdot 1,59 - 170 = 179,8$$

5. Определить мощность холостого хода,  $P_{\text{хх}}$ , Вт:

$$P_{\text{хх}} = \Sigma \Delta P_{\text{НОМ}} - \Delta P_{\text{эя}} = 179,8 - 1,57 = 178,23$$



6. Определить номинальный момент двигателя,  $M_{ном}$ , Нм:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{170 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 750} = 2,17$$

7. Определить магнитный поток двигателя, кФ, Вб:

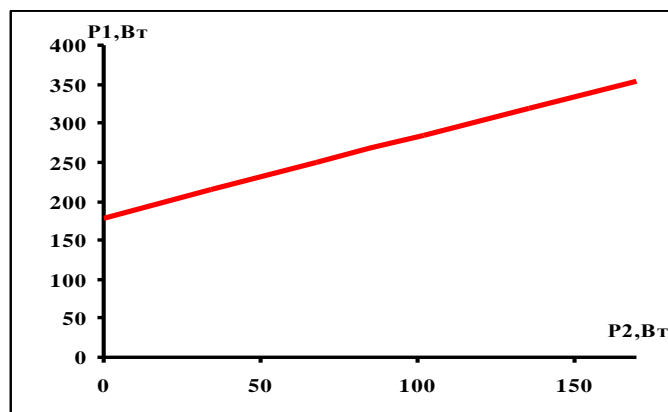
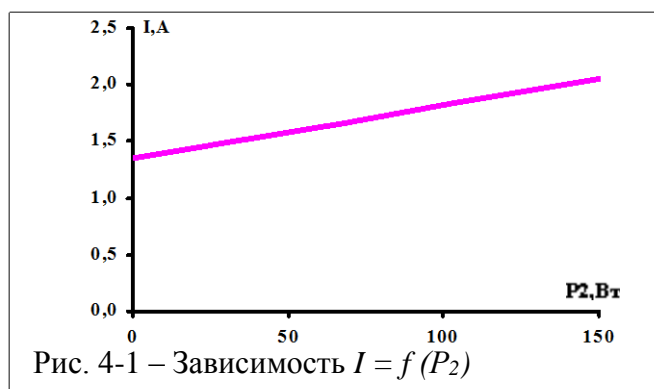
$$\kappa\Phi = \frac{U_{ном} - I_{я} R_{я}}{\omega_{ном}} = \frac{220 - 0,24 \cdot 27,2}{78,5} = 2,72$$

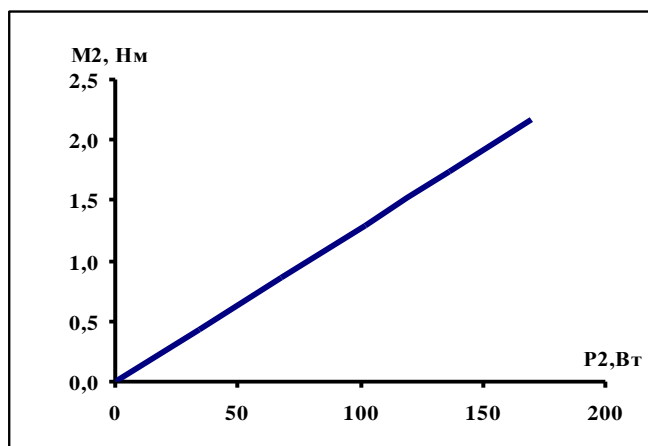
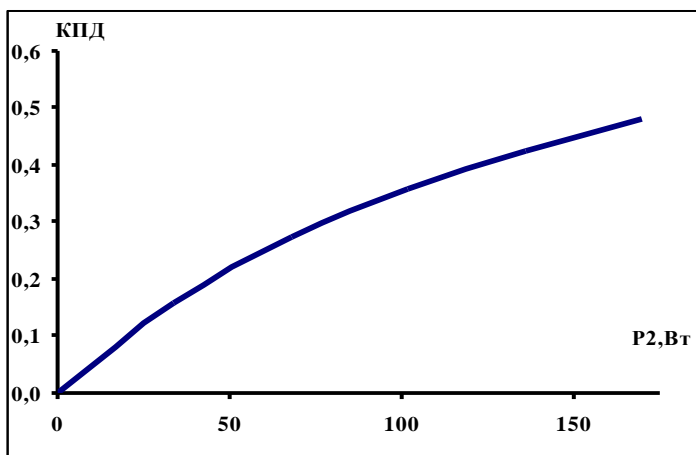
8. Для построения рабочих характеристик двигателя необходимо задаться рядом значений  $P_2$  и использовать приложение *Microsoft Excel*.

Расчётные данные приведены в таблице 5, а вид характеристик на рисунке 4.1... 4.4.

Таблица 5 – Расчётные данные для построения рабочих характеристик

$\kappa$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$P_2 = \kappa P_{ном}, Вт$	0	34	68	102	136	170
$M_2 = \frac{P_2}{\omega_{ном}}, Нм$	0,0	0,4	0,9	1,3	1,7	2,2
$I_{я} = \frac{M_2}{\kappa\Phi}, А$	0,00	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80
$I = I_{я} + I_{г}, А$	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1
$P_1 = U_{ном} I, Вт$	179,0	213,7	249,8	287,2	326,0	366,2
$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	0,00	0,16	0,27	0,36	0,42	0,46



Рис. 4-3 – Зависимость  $M_2 = f(P_2)$ Рис. 4-4 – Зависимость  $\eta = f(P_2)$

## Практическая работа 5

### «Построение механических характеристик ДПТНВ для различных режимов работы. Расчёт тормозных резисторов»

#### Цель работы:

1. Научиться рассчитывать параметры и строить механические характеристики ДПТНВ для различных энергетических режимов.
2. Научиться производить расчёт тормозных резисторов.

#### Задание для расчета:

1. Определить параметры и построить естественную характеристику ДПТНВ.
2. Рассчитать величину дополнительного сопротивления в цепи якоря двигателя при торможении противовключением и построить механическую характеристику двигателя в данном режиме, если статический момент  $M_c = M_H$ , а тормозной момент  $M_{т}^{np} = 2,5M_H$ .
3. Определить величину добавочного сопротивления двигателя в режиме рекуперативного торможения и построить механическую характеристику двигателя в данном режиме. Величина тормозного момента  $M_{т}^{pt} = M_H$ , а скорость в генераторном режиме  $w_{т}^{pt} = 1,2w_{ном}$ .
4. Определить величину добавочного сопротивления двигателя в режиме динамического торможения и построить механическую характеристику двигателя в данном режиме, если тормозной момент  $M_{т}^D = 2,2M_H$ .

#### Формулы для расчёта

Подводимая мощность:

$$P_{1\partial в} = UI$$

Номинальная (полезная) мощность:

$$P_{2\partial в} = P_{ном\partial в} = M_{ном} \omega$$

Угловая скорость

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Сопротивление обмотки якоря

$$R_{я} = \frac{0,5 \cdot U_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{I_{ном}}$$

Уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{д}}{(k\Phi)^2},$$

Ток торможения противовключением

$$I_m^{np} = \frac{E + U}{R_{я} + R_{np}}.$$

Ток в режиме рекуперативного торможения

$$I_m^{pm} = -\frac{U_n - E}{R_{я}}.$$

Ток в режиме динамического торможения

$$I_m^{\partial m} = -\frac{E}{R_{я} + R_{\partial m}}$$

**Данные для расчёта:**

Исходными величинами для построения механических характеристик двигателя постоянного тока являются паспортные данные двигателя и величины статического момента нагрузки.

Таблица 6 – Данные для выполнения практической работы 5

<b>Вариант</b>	<b><math>P_{\text{ном}}</math>, кВт</b>	<b><math>U_{\text{ном}}</math>, В</b>	<b><math>n_{\text{ном}}</math>, об/мин</b>	<b><math>\eta_{\text{ном}}</math>, %</b>
<b>1</b>	55	220	1220	87
<b>2</b>	75	220	1500	89,5
<b>3</b>	10	220	1200	89,5
<b>4</b>	125	220	1000	90
<b>5</b>	200	220	1500	91
<b>6</b>	42	110	2240	88
<b>7</b>	32	110	1060	86
<b>8</b>	25	110	1600	86
<b>9</b>	75	440	3000	89,5
<b>10</b>	15	440	750	83
<b>11</b>	6	110	750	83,5
<b>12</b>	8	110	1000	86
<b>13</b>	11	220	500	80
<b>14</b>	14	220	500	83
<b>15</b>	19	220	600	81,5
<b>16</b>	25	110	750	83,5
<b>17</b>	32	110	1000	84,5
<b>18</b>	55	220	1500	87
<b>19</b>	75	220	750	88
<b>20</b>	100	220	750	89,6
<b>21</b>	1,5	220	1500	78,5
<b>22</b>	13,5	220	1060	84
<b>23</b>	42	110	750	85,3
<b>24</b>	6	220	1500	82,5
<b>25</b>	8	220	1500	84,5
<b>26</b>	11	110	1500	84
<b>27</b>	25	220	1500	82,5
<b>28</b>	19	220	750	84,7
<b>29</b>	12	220	1500	85,2
<b>30</b>	3,2	220	685	79

**Пример расчета:**

Дано:

$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	$\eta_{\text{НОМ}}, \%$
50	220	1120	85

**1. Построение естественной механической характеристики.**

1.1. Определить величину номинального тока:

$$I_n = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}} [A], \quad I_n = \frac{50 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,85} = 267,4 [A]$$

1.2. Определить величину сопротивления обмотки якоря:

$$R_{\text{я}} = \frac{0,5 \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot (1 - \eta_{\text{НОМ}})}{I_{\text{НОМ}}} [\text{Ом}], \quad R_{\text{я}} = \frac{0,5 \cdot 220 \cdot (1 - 0,85)}{267,4} = 0,062 [\text{Ом}]$$

1.3. Определить величину угловой скорости:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60} [\text{рад/с}], \quad \omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi \cdot 1120}{60} = 117,3 [\text{рад/с}]$$

1.4. Определить номинальное значение магнитного потока:

$$\kappa \Phi_n = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{НОМ}}} [\text{Вб}], \quad \kappa \Phi_n = \frac{220 - 267,4 \cdot 0,062}{117,3} = 1,73 [\text{Вб}]$$

1.5. Определить величину угловой скорости холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\kappa \Phi_n} [\text{рад/с}], \quad \omega_0 = \frac{220}{1,73} = 127,2 [\text{рад/с}]$$

1.6. Определить величину номинального момента на валу двигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} [\text{Нм}], \quad M_n = \frac{50 \cdot 10^3}{117,3} = 426,3 [\text{Нм}]$$

1.7. Построить естественную механическую характеристику:

Механическая характеристика ДПТНВ проходит через две точки:

- точка холостого хода  $\omega = \omega_0 = 127,3 \text{ рад/с}; M = 0$ ;
- точка номинального режима работы  $\omega = \omega_n = 117,3 \text{ рад/с}; M = M_n = 426,3 \text{ Нм}$ .

Вид естественной механической характеристики представлен на рисунке 5.1.

**2. Построение механической характеристики торможения противовключения. Расчет сопротивления противовключения.**

2.1. Определить величину ЭДС обмотки якоря:

$$E_{\text{я}} = \kappa \Phi_n \omega_n [B], \quad E_{\text{я}} = 1,73 \cdot 117,3 = 202,9 [B]$$

2.2. Определить величину сопротивления противовключения:

$$R_{\text{np}} = \frac{E + U}{I_m^{\text{np}}} - R_{\text{я}} [\text{Ом}], \quad R_{\text{np}} = \frac{202,9 + 220}{2,5 \cdot 267,4} - 0,062 = 0,571 [\text{Ом}]$$

2.3. Определить величину момента в начале торможения:

$$M_m^{\text{np}} = -2,5 M_n [\text{Нм}], \quad M_m^{\text{np}} = -2,5 \cdot 426,3 = -1065,7 [\text{Нм}]$$

2.4. Определить ток конца торможения:

$$I_m^{\kappa} = -\frac{U_n}{R_{\kappa} + R_{np}}[A],$$

$$I_m^{\kappa} = \frac{-220}{0,062 + 0,571} = -347,5[A]$$

2.5. Определить момент конца торможения:

$$M_m^{\kappa} = \frac{I_m^{\kappa}}{I_n} \cdot M_n [H\cdot m],$$

$$M_m^{\kappa} = \frac{-347,5}{267,5} \cdot 426,3 = -553,8[H\cdot m]$$

2.6. Определить угловую частоту вращения, в режиме противовключения в начале торможения:

$$\omega_{np} = -\frac{U_n}{\kappa \Phi_n} + \frac{M_m^{np} \cdot (R_{\kappa} + R_{np})}{(\kappa \Phi_n)^2} \left[ \frac{рад}{с} \right],$$

$$\omega_{np} = -\frac{220}{1,73} + \frac{1065,7 \cdot (0,062 + 0,571)}{1,73^2} = 98 \left[ \frac{рад}{с} \right].$$

2.7. Построить механическую характеристику торможения противовключения:

- точка начала торможения  $\omega_{np} = 98 рад/с$ ;  $M_m^{np} = -1065,7$ ;

- точка конца торможения  $\omega_{\kappa} = 0 рад/с$ ;  $M_m^{\kappa} = -553,8 Н\cdot м$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 5.1.

### 3. Построение механической характеристики рекуперативного торможения. Расчет сопротивления рекуперативного торможения.

3.1. Определить величину момента в начале торможения:

$$M_m^{pm} = -M_n [H\cdot m],$$

$$M_m^{pm} = -426,3 [H\cdot m]$$

3.2. Определить угловую частоту при рекуперативном торможении:

$$\omega_{pm} = 1,2 \omega_n \left[ \frac{рад}{с} \right],$$

$$\omega_{pm} = 1,2 \cdot 117,3 = 140,76 \left[ \frac{рад}{с} \right].$$

3.3. Определить величину сопротивление при рекуперативном торможении:

$$R_m^{pm} = -\frac{U_{ном} - E}{I_m^{pm}} - R_{\kappa} [Ом],$$

$$R_m^{pm} = -\frac{220 - 1,73 \cdot 140,76}{267,5} - 0,062 = 0,026 [Ом],$$

3.4. Построить механическую характеристику рекуперативного торможения.

Характеристика является продолжением естественной характеристики, и проходить через

- точку рекуперативного режима  $\omega_{pm} = 140,76 рад/с$ ;  $M_m^{pm} = -426,3 Н\cdot м$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 5.2

### 4. Построение механической характеристики динамического торможения. Расчет сопротивления динамического торможения.

4.1. Определить величину момента динамического торможения:

$$M_m^{\partial m} = -2,2 M_n [H\cdot m],$$

$$M_m^{\partial m} = -2,2 \cdot 426,3 = -937,9 [H\cdot m]$$

4.2. Определить величину сопротивление при динамическом торможении:

$$R_m^{\partial m} = \frac{E}{I_m^{\partial m}} - R_{\kappa} [Ом],$$

$$R_m^{\partial m} = -\frac{1,73 \cdot 117,3}{2,2 \cdot 267,5} - 0,062 = 0,283 [Ом],$$

4.3. Определить угловую скорость динамического торможения:

$$\omega_{dm} = - \frac{M_m^{dm} \cdot (R_{\pi} + R_{l\partial\partial})}{(\kappa \Phi_H)^2} \left[ \frac{pad}{c} \right],$$

$$\omega_{dm} = \frac{937,9 \cdot (0,062 + 0,283)}{1,73^2} = 108 \left[ \frac{pad}{c} \right].$$

4.4. Построить механическую характеристику динамического торможения:

- первая точка  $\omega=0$ ;  $M=0$ ;

- точка режима торможения  $\omega_{dm}=108pad/c$ ;  $M_m^{dm} = -937,9Hm$ .

Вид механической характеристики представлен на рисунке 5.3.

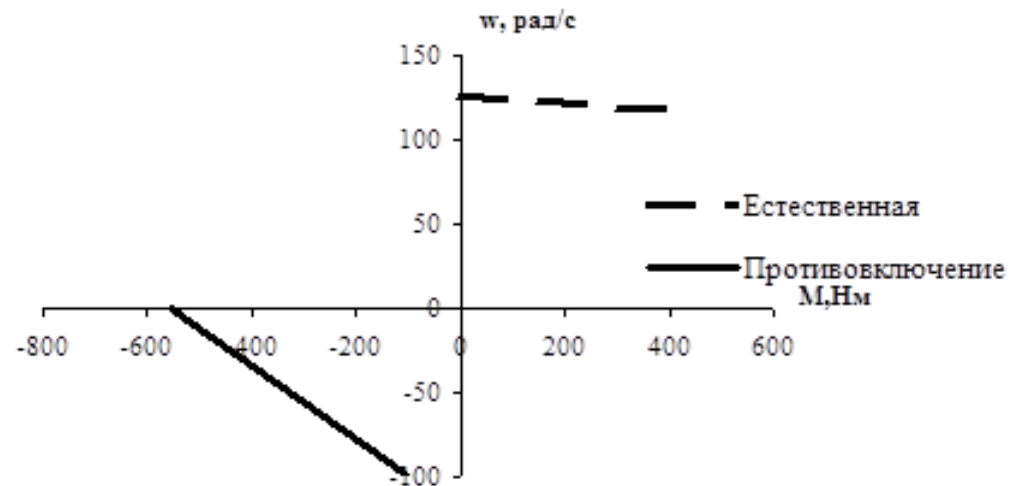


Рис.5.1

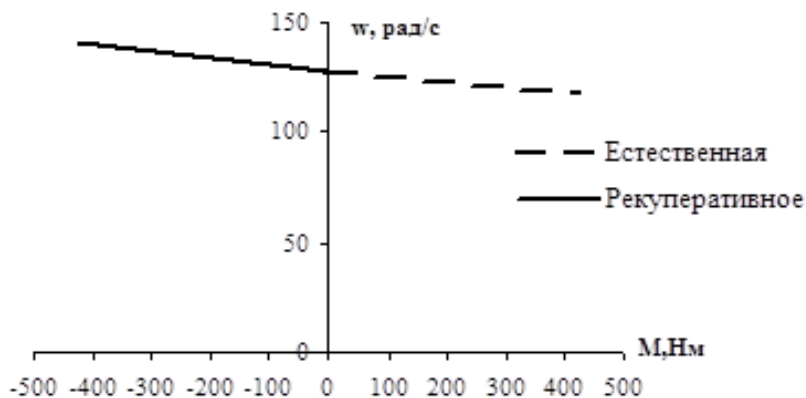


Рис.5.2

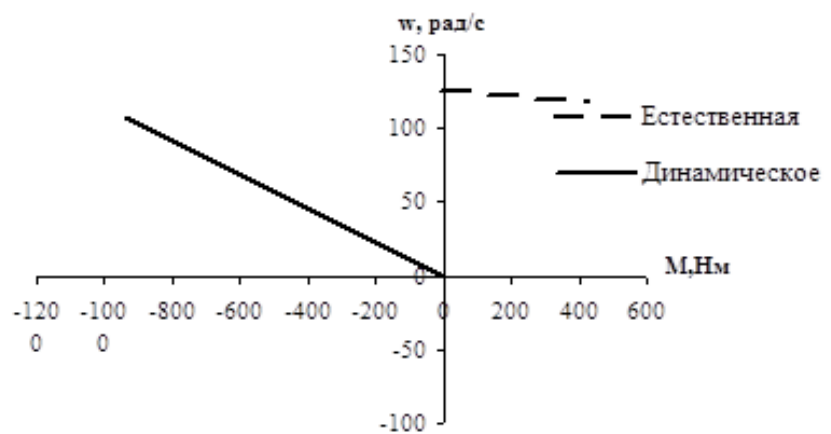


Рис.5.3

## Практическая работа 6

### «Расчет пусковых резисторов для двигателей постоянного тока»

#### Цель работы:

1. Научиться рассчитывать величину пусковых резисторов графическим и аналитическим методом.
2. Научиться строить пусковую диаграмму двигателя постоянного тока.

При пуске ДПТНВ необходимо выполнить два основных условия:

- не допустить чрезмерно большого пускового тока опасного для обмотки якоря, щеточных контактов и коллектора;
- обеспечить пусковой вращающий момент необходимой величины и нормальные условия для разгона двигателя с исполнительным механизмом.

Эти условия обеспечиваются надлежащим выбором величины пускового сопротивления, которое реализуется с помощью регулировочного резистора.

Регулировочный резистор секционируется на соответствующее число ступеней, которые закорачиваются последовательно по мере разгона двигателя.

Число ступеней  $m$  добавочного резистора (число используемых искусственных характеристик) связано с пределами изменения тока в якоре  $I_1 = I_{дон}$  и током переключения  $I_2$  следующим соотношением:

$$m = \frac{\lg \frac{I_1}{I_2}}{\lg \frac{I_1 R_{я}}{U}} \quad (6.1)$$

#### Задание для расчета:

1. Построить пусковую диаграмму.
2. Рассчитать величину пускового сопротивления в цепи якоря графическим и аналитическим методом, если величина допустимого момента  $M_1 = 2,3M_H$ .

#### Данные для расчёта:

Исходными величинами для расчета пусковых резисторов являются паспортные данные двигателя и величина допустимого момента нагрузки.

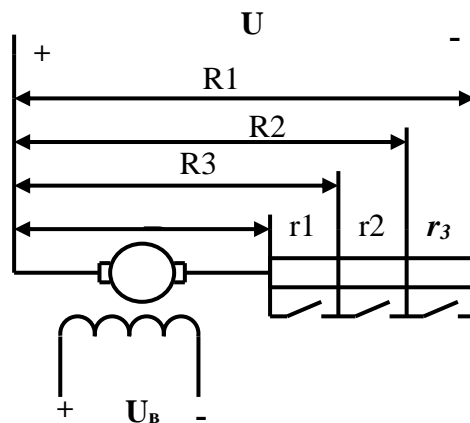


Рис. 6.1 – Схема включения регулировочного резистора



Таблица 7 – Данные для выполнения практической работы 6

Вариант	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$
1	55	220	1220	87
2	75	220	1500	89,5
3	10	220	1200	89,5
4	125	220	1000	90
5	200	220	1500	91
6	42	110	2240	88
7	32	110	1060	86
8	25	110	1600	86
9	75	440	3000	89,5
10	15	440	750	83
11	6	110	750	83,5
12	8	110	1000	86
13	11	220	500	80
14	14	220	500	83
15	19	220	600	81,5
16	25	110	750	83,5
17	32	110	1000	84,5
18	55	220	1500	87
19	75	220	750	88
20	100	220	750	89,6
21	1,5	220	1500	78,5
22	13,5	220	1060	84
23	42	110	750	85,3
24	6	220	1500	82,5
25	8	220	1500	84,5
26	11	110	1500	84
27	25	220	1500	82,5
28	19	220	750	84,7
29	12	220	1500	85,2
30	3,2	220	685	79

**Порядок расчета:**

**Графический метод**

Графический метод основан на построении пусковой диаграммы.

По горизонтальной оси откладываются значения номинального и допустимого тока, а по вертикальной оси значение скорости холостого хода.

Значение скорости холостого хода, сопротивления обмотки якоря и номинального тока рассчитываются по формулам из практической работы 2.

*Порядок построения:*

1. Строится естественная механическая характеристика двигателя (характеристика 1) (рисунок 6.1).
2. Строится вертикальная линия, соответствующая абсциссе  $I_1 = I_{\text{доп}}$ .
3. Через точки холостого хода (т. А) и короткого замыкания (т. В) проводится искусственная механическая характеристика, соответствующая включению в цепь якоря всех ступеней пускового резистора (характеристика 4).
4. Строится вертикальная линия, соответствующая абсциссе  $I_2 = I \dots I, I_{\text{ном}}$ .
5. Через точку пересечения линии тока  $I_2$  с характеристикой 4 проводится горизонтальная линия до пересечения с линией тока  $I_1$  (т. Д).
6. Через точки А и Д проводится искусственная характеристика 3.
7. Дальнейшее построение ведется аналогично п.п. 5, 6 до пересечения с естественной характеристикой двигателя.

Для определения величины сопротивлений  $r_1$ ;  $r_2$ ;  $r_3$  необходимо измерить расстояние между искусственными характеристиками двигателя и полученные величины умножить на масштаб сопротивления.

Масштаб сопротивления определяется по формуле:

$$n_c = R_a / ab \quad (6.2)$$

Величина сопротивлений секций:

$$r_1 = n_c \cdot ed \quad r_2 = n_c \cdot cd \quad r_3 = n_c \cdot cb \quad (6.3)$$

Величина пускового сопротивления:

$$R_n^c = r_1 + r_2 + r_3 \quad (6.4)$$

**Примечание:** Если при построении окажется, что последняя горизонталь не пересекает естественную характеристику, то необходимо изменить значения тока переключения ( $I_2$ ) и повторить построение.

#### *Аналитический метод*

На практике графический метод применяется редко, т.к. не обеспечивает достаточной точности и метод громоздкий.

Расчёт пусковых сопротивлений аналитическим методом ведётся в следующем порядке:

1. Определяется число пусковых ступеней, которое зависит от мощности двигателя и определяется по таблице 8.

Таблица 8 – Определение количество ступеней при пуске ДПТНВ.

Мощность	Количество ступеней, $m$
$P_{\text{НОМ}} < 10 \text{ кВт}$	2
$10 \text{ кВт} < P_{\text{НОМ}} < 50 \text{ кВт}$	3
$P_{\text{НОМ}} > 50 \text{ кВт}$	4

**Примечание:**

1. Если число ступеней неизвестно, то его рассчитывают по формуле (3.1).
2. Если число ступеней получается дробным числом, то изменяют величину тока переключения.
3. Определить отношение максимального тока к переключения:
  - а) для нормального пуска задаются током  $I_2$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt[m+1]{\frac{U}{I_2 R_{\text{я}}}} \quad (6.5)$$

- б) для приводов, работающих с большим числом пусков в час, задаются током  $I_1$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt[m]{\frac{U}{I_1 R_{\text{я}}}} \quad (6.6)$$

4. Определить сопротивления отдельных ступеней:

$$R_1 = \frac{U}{I_1} \quad R_2 = \frac{R_1}{\lambda} \quad R_3 = \frac{R_2}{\lambda} \quad (6.7)$$

5. Определить сопротивления секций:

$$r_1 = R_1 - R_2 \quad r_2 = R_2 - R_3 \quad r_3 = R_3 - R_{\text{я}} \quad (6.8)$$

6. Определить величину пускового сопротивления ( $R_{\text{п}}^{\text{а}}$ ) по формуле (3.4).

Сравнить результаты аналитического и графического метода расчета и сделать вывод.

$$\left( \frac{R_n^{\text{а}} - R_n^{\text{с}}}{R_n^{\text{а}}} \right) \cdot 100\% < \pm 10\% \quad (6.9)$$

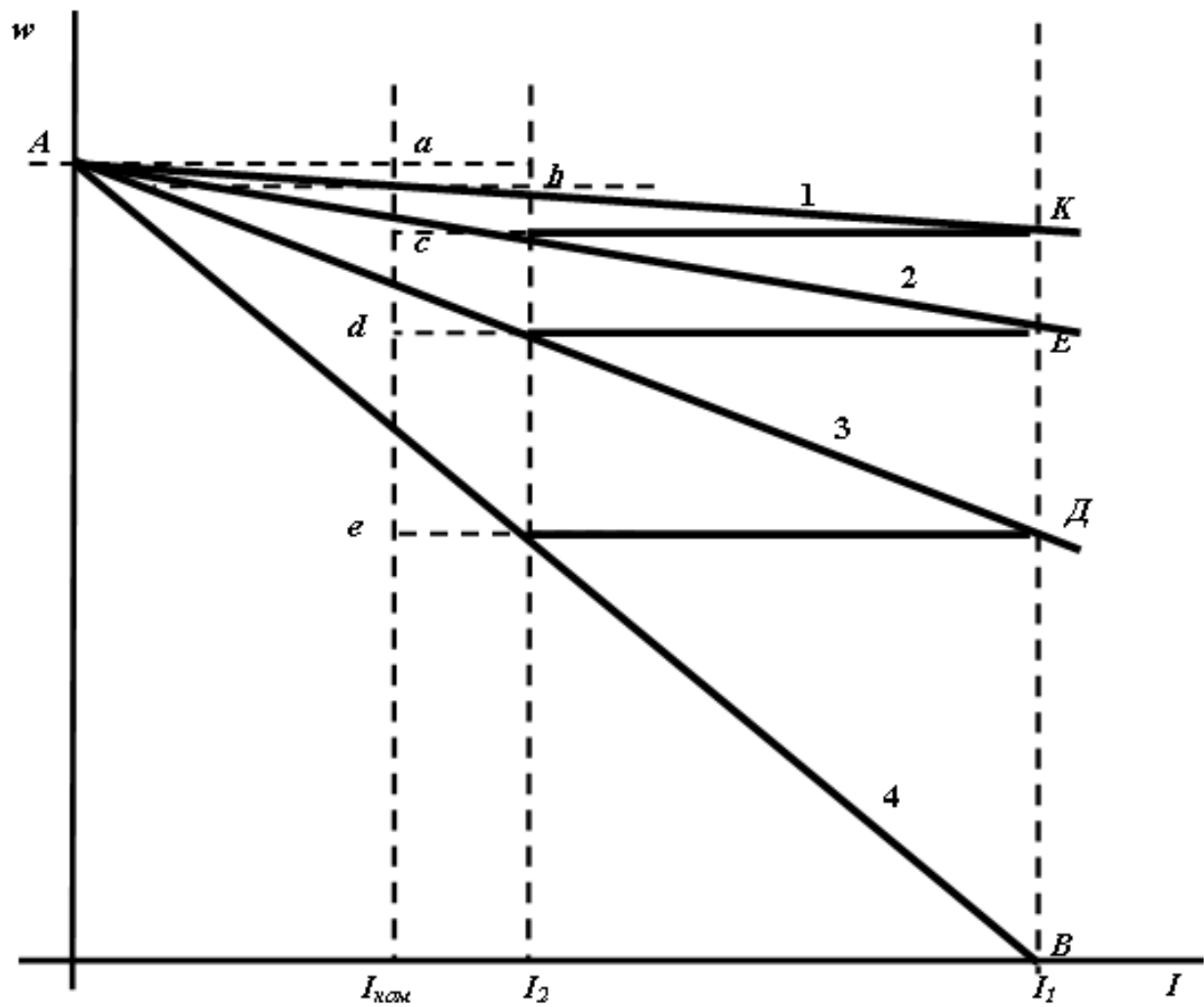


Рис.6.1