

### 6. Расчёт искусственных электромеханических и механических характеристик ДПТ НВ

Искусственные характеристики при пуске можно рассчитать по формулам (3.1) и (3.2), учитывая, что сопротивление цепи якоря

$$R = R_{\text{ДП}} + R_{\text{я}}$$

$$R_1 = 0,909 \text{ [Ом]}; R_2 = 0,51 \text{ [Ом]}; R_3 = 0,2861 \text{ [Ом]}.$$

Пуск по первой ступени пускового реостата

$$R_{\text{ДП}} = R_1 = 0,909 \text{ [Ом]}.$$

<i>W</i>	0,02	17,2	34,4	51,7	68,9	75,6	86,1	87,5
<i>I</i>	242	218	194	169	145	136	121	119
	21н	1,8 In	1,6 In	1,4 In	1,2 In	I2	In	Ic1
<i>M</i>	309	278	247	216	185	173	154	119
	M1	1,8 Mn	1,6 Mn	1,4 Mn	1,2 Mn	M2	Mn	Mc1

Пуск по второй ступени пускового реостата

$$R_{\text{ДП}} = R_2 = 0,51 \text{ [Ом]}.$$

<i>W</i>	75,6	85,3	95	105	114	118	124	125
<i>I</i>	242	218	194	169	145	136	121	119
	21	1,8 In	1,6 In	1,4 In	1,2 In	I2	In	Ic1
<i>M</i>	309	278	247	216	185	173	154	152
	M1	1,8 Mn	1,6 Mn	1,4 Mn	1,2 Mn	M2	Mn	Mc1

Пуск по третьей ступени пускового реостата

$$R_{\text{ДП}} = R_3 = 0,2861 \text{ [Ом]}.$$

<i>W</i>	118	124	129	134	140	142	145	146
<i>I</i>	242	218	194	169	145	136	121	119
	21н	1,8 In	1,6 In	1,4 In	1,2 In	I2	In	Ic1
<i>M</i>	309	278	247	216	185	173	154	152
	M1	1,8 Mn	1,6 Mn	1,4 Mn	1,2 Mn	M2	Mn	Mc1

Введение.....	3
Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины «Судовые электроприводы».....	4
Задание на курсовое проектирование.....	4
1. Расчет мощности электродвигателя.....	5
2. Основы теории работы двигателей постоянного тока независимого возбуждения.....	6
3. Проверка двигателя по нагреву.....	12
4. Расчёт расхода и потерь электроэнергии за цикл работы электропривода.....	12
Библиографический список.....	16
Варианты заданий к 1-й части проекта.....	17
Приложение.....	19

Необходимо только отметить, что в (3.3) входит момент на валу двигателя, а механическая характеристика построена в функции электромагнитного момента. Но определение  $M_{ст}$  описанным выше способом допустимо ввиду небольшой разницы между электромагнитным моментом и моментом на валу.

Значение  $I_{ст}$  можно определить, пользуясь естественной электромеханической характеристикой  $W = f(I)$ , по значениям  $W_{ст}$ .

#### 4. Расчёт сопротивлений пусковых резисторов

##### Аналитический метод

Полагая режим пуска форсированным, задаёмся числом ступеней пускового реостата  $m = 3$ , пусковым моментом  $M_1 = 2M_H = 2 \cdot 154,505 = 309,01$  [кг·м] и определяем кратность пускового момента и момента переключения по формуле

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{R^* \cdot \sigma_B \cdot M^* \cdot 1}},$$

где  $R^* \cdot \sigma_B = R_{вн} / R_n$  – внутреннее сопротивление ДПТ НВ в относительных единицах;

$$R_n = U_H / I_H = 220 / 121 = 1,818 \text{ [Ом]};$$

$$R^* \cdot \sigma_B = 0,1605 / 1,818 = 0,0883;$$

$M^* \cdot 1 = M_1 / M_n$  – пусковой момент в относительных единицах равен 2.

Таким образом,

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{1}{0,0883 \cdot 2}} = 1,783.$$

Момент переключения:

$$M_2 = M_1 / \lambda = 309,01 / 1,783 = 173,35 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2].$$

Сопротивления ступеней пускового реостата и полные сопротивления якорной цепи на каждой ступени пуска рассчитываются по следующим формулам:

$$R_{п3} = R_{вн} (\lambda - 1) = 0,1605 \cdot (1,783 - 1) = 0,1256 \text{ [Ом]};$$

$$R_3 = R_{вн} \lambda = 0,1605 \cdot 1,783 = 0,2861 \text{ [Ом]};$$

$$R_{п2} = R_{вн} \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1) = 0,1605 \cdot 1,783 (1,783 - 1) = 0,2239 \text{ [Ом]};$$

$$R_2 = R_{вн} \cdot \lambda^2 = 0,1605 \cdot 1,783^2 = 0,51 \text{ [Ом]};$$

$$R_{п1} = R_{вн} \cdot \lambda^2 (\lambda - 1) = 0,1605 \cdot 1,783^2 (1,783 - 1) = 0,399 \text{ [Ом]};$$

$$R_1 = R_{вн} \cdot \lambda^3 = 0,1605 \cdot 1,783^3 = 0,909 \text{ [Ом]}.$$

#### 5. Расчёт сопротивлений резисторов торможения

##### Динамическое торможение

Сопротивление резистора торможения рассчитывается по формуле

$$R_{ДТ} = E_{\max} / I_{\text{ост}} - R_{ДВ},$$

где  $E_{\max}$  – максимальное значение ЭДС двигателя;  $I_{\text{ост}} = I_{a \max}$  – допустимое значение тока якоря, равное

$$2 \cdot I_H = 2 \cdot 121 = 242 \text{ [А]}.$$

Максимальное значение ЭДС  $E_{\max}$  определяем

$$E_{\max} = K \Phi_n \cdot W_{\max} = 1,2769 \cdot 162 = 206,858 \text{ [В]},$$

где  $W_{\max} = W_{с3} = 162$  [рад/с] – максимальное возможное значение скорости вращения, определяется из условия двигательного режима, предшествующего динамическому торможению, по последнему значению статического момента.

Таким образом,

$$R_{ДТ} = \frac{206,858}{242} - 0,1605 = 0,694 \text{ [Ом]}.$$

Произведение  $K\Phi_H$  можно определить по паспортным данным из уравнения (3.1)

$$K\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{\text{об}},}{W_H},$$

где  $W_H$  – номинальное значение угловой скорости вращения двигателя:

$$W_H = 2\pi N_H / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157,08 \text{ [рад/с]},$$

Внутреннее сопротивление ДПТ НВ, приведённое к рабочей температуре, рассчитывается по формуле

$$R_{\text{об}} = (R_a + R_{\text{ДПТ}}) \frac{273 + t_p^\circ}{273 + t_s^\circ} + R_{\text{щ}},$$

где  $R_a$  – сопротивление обмотки якоря;  $R_{\text{ДПТ}}$  – сопротивление обмоток дополнительных полюсов;  $t_p^\circ$  – рабочая температура (в данном случае  $70^\circ\text{C}$ );  $t_s^\circ$  – температура, при которой задаются сопротивления ( $t_s^\circ = 15^\circ\text{C}$  или  $t_s^\circ = 20^\circ\text{C}$ );  $R_{\text{щ}} = \Delta U / I_H$  – сопротивление сеточных контактов ( $\Delta U$  – падение напряжения на щётках, которое принимается равным 2 В).

$$R_{\text{щ}} = 2 / 121 = 0,0165 \text{ [Ом]},$$

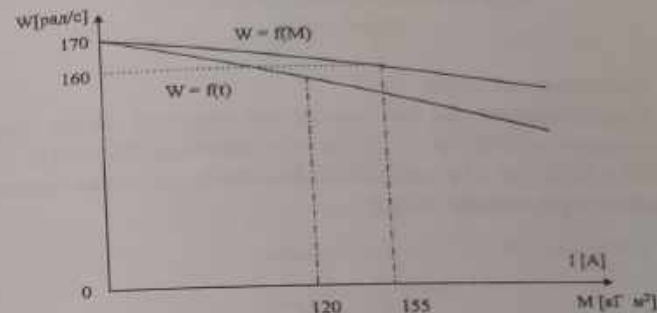
таким образом,

$$R_{\text{об}} = (0,091 + 0,032) \frac{273^\circ + 70^\circ}{273^\circ - 20^\circ} - 0,0165 = 0,1605 \text{ [Ом]},$$

следовательно,

$$K\Phi_H = \frac{220 - 121 \cdot 0,1605}{157,08} = 1,2769.$$

Поскольку все статические характеристики без учёта насыщения магнитопровода представляют собой прямые линии, то они могут быть построены по двум точкам, одна из которых соответствует скорости идеального холостого хода ( $I = 0$  или  $M = 0$  и  $W = W_0 = U_H / K\Phi_H = 220 / 1,2769 = 172,29$  [рад/с]), а другая – работе при номинальном режиме работы ( $I = I_H = 121$  А или  $M = M_H = I_H \cdot K\Phi_H = 121 \cdot 1,2769 = 154,505$  [кг·м<sup>2</sup>] и  $W = W_H = 157,08$  [рад/с]).



#### Определение значений статических моментов

Мощность нагрузки  $P$  связана с моментом на валу двигателя соотношением  $P = MW$ , пользуясь которым можно определить значение  $M_c$  для каждой нагрузки. Для этого на координатной плоскости, где построена естественная механическая характеристика  $W = f(M)$ , нужно построить  $i$ -е количество вспомогательных кривых по уравнению

$$M = \frac{P_i}{W}, \quad (3.3)$$

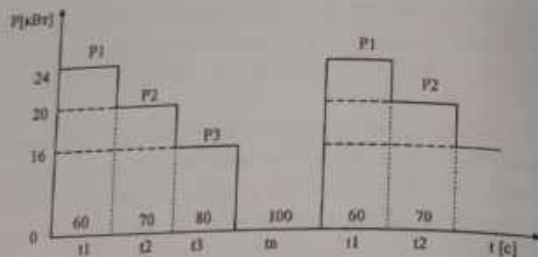
где  $P_i$  –  $i$ -е значение мощности нагрузки ( $i = 1, \dots, n$ );  $W$  – скорость вращения двигателя, которая задаётся в пределах примерно (0,7, ..., 1,3)  $W_H$ .

Точка пересечения  $i$ -й вспомогательной кривой с естественной характеристикой и даёт  $M_{c_i}$ .

Продолжение приложения

### 1. Построение нагрузочной диаграммы по исходным данным

Исходной информацией для расчёта и выбора мощности двигателя является нагрузочная диаграмма механизма  $P(t)$ .



### 2. Расчёт мощности и выбор двигателя по каталогу

Расчёт мощности двигателя производится по эквивалентной мощности за цикл работы электродвигателя по формуле:

$$P_{\Sigma} = \sqrt{\frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_n}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 60 + 20 \cdot 70 + 16 \cdot 80}{60 + 70 + 80 + 100}} = 16,3668 \text{ [кВт]}$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -й нагрузки;  $t_i$  – время работы под  $i$ -й нагрузкой;  $t_n$  – время паузы.

Двигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима, рассчитываются и выпускаются на стандартную продолжительность включения:

$$ПВ\% = \left( \frac{t_p}{t_p + t_n} \right) \cdot 100\% = \frac{60 + 70 + 80}{60 + 70 + 80 + 100} \cdot 100\% = 67,74\%$$

где  $t_p$  – время работы под нагрузкой, которое может составлять 15, 25, 40 и 60%. Поэтому при выборе мощности двигателя по каталогу необходимо учесть его стандартную ПВ и пересчитать значение  $P_{\Sigma}$  по формуле

$$P_{\Sigma ст} = \frac{P_{\Sigma}}{\sqrt{ПВ ст}} = \frac{16,3668}{\sqrt{0,6774}} = 19,835 \text{ [кВт]}$$

Продолжение приложения

По каталогу выбираем двигатель типа П71М: электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения; частота вращения  $N_H = 1500$  об/мин; номинальная мощность двигателя  $P_H = 20$  кВт; номинальное напряжение двигателя  $U_H = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_H = 121$  А; КПД = 81,5%; максимально допустимая частота вращения  $N_{max} = 3600$  об/мин; наибольшая частота вращения при ослаблении поля 2550 об/мин; кратность максимально допустимого тока номинальному

$I_{d, max} / I_{H, ном} = 2$ ;  
 маховый момент  $GD = 1,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
 число главных полюсов  $2p = 4$ ;  
 число параллельных ветвей якоря  $2a = 2$ ;  
 число витков якоря – 198;  
 сопротивление обмотки якоря  $R_d = 0,091$  Ом;  
 сопротивление добавочных полюсов  $R_{ДП} = 0,032$  Ом.  
 Обмотки главных полюсов:  
 Последовательная: число витков на полюс – 4;  
 сопротивление – 0,0049 Ом.  
 Параллельная: число витков на полюс – 1250;  
 сопротивление – 77 Ом.

### 3. Расчёт и построение естественных электромеханических $w = f(t)$ и механических $w = f(m)$ характеристик

Данные зависимости описываются следующими выражениями:

$$W = \frac{U_H}{K\Phi_H} - \frac{I R_{\Sigma}}{K\Phi_H} \quad (3.1)$$

$$W = \frac{U_H}{K\Phi_H} - \frac{M R_{\Sigma}}{(K\Phi_H)^2} \quad (3.2)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение двигателя;  $K\Phi_H$  – произведение конструктивного коэффициента двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) и магнитного потока;  $I$  – ток якоря;  $M = I K\Phi_H$  – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;  $R_{\Sigma}$  – внутреннее сопротивление двигателя.

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	15	18	32	4	10	10	50	10	60
21	3	9	18	2	5	4	1	2	4
22	6	18	36	4	10	8	2	4	8
23	9	27	54	6	15	12	3	6	12
24	12	36	72	8	20	15	4	8	16
25	100	20	50	75	17	34	51	2	60
26	50	10	25	150	34	17	100	12	30
27	0	4	16	10	5	10	10	25	30
28	30	0	25	30	100	40	10	17	100
29	10	20	0	10	30	10	10	20	60
30	4	10	0	10	30	3	10	5	50
31	30	10	5	0	10	10	3	40	60
32	10	100	350	400	50	10	10	50	5
33	4	100	4	10	10	10	10	50	10
34	200	150	100	200	20	20	20	20	20
35	20	200	100	20	20	5	4	10	60

Примечание. Мощность дана в киловаттах, время – в секундах.

### Пример выполнения задания на проектирование разомкнутой системы электропривода

Разработать и рассчитать разомкнутую систему электропривода механизма, имеющего заданную нагрузочную диаграмму  $P$ ,  $P_1 = 24$  кВт,  $P_2 = 20$  кВт,  $P_3 = 16$  кВт,  $t_1 = 60$  с,  $t_2 = 70$  с,  $t_3 = 80$  с,  $t_n = 100$  с.

При разработке необходимо предусмотреть возможность запуска двигателя в несколько ступеней и остановку динамическим торможением. Запуск двигателя производится под нагрузкой  $P_1$ , затем на естественной характеристике следует работа под нагрузкой в соответствии с графиком  $P(t)$ . Торможение осуществляется на холостом ходу. Момент инерции механизма  $J_{\text{мех}}$ , приведённый к валу двигателя, принять равным  $2J_{\text{дв}}$ .

Курсовой проект должен включать в себя:

- 1) построение нагрузочной диаграммы по исходным данным;
- 2) расчёт мощности и выбор двигателя по каталогу;
- 3) расчёт сопротивлений пусковых резисторов и резисторов торможения;
- 4) расчёт и построение статических электромеханических и механических характеристик во всех режимах работы электропривода;
- 5) проверку двигателя по нагреву методом эквивалентного тока или эквивалентного момента;
- 6) расчёт расхода и потерь электроэнергии за цикл работы электропривода;
- 7) разработку принципиальной схемы управления электроприводом и описание её работы;
- 8) спецификацию схемы управления;
- 9) заключение.

### Библиографический список

1. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Академия, 2007. – 362 с.
2. Кирюха В.В. Судовые электроприводы. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2013. – 82 с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 576 с.
4. Сенигов П.Н., Карпеш Н.А. Электрический привод. Руководство по выполнению базовых экспериментов. – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. – 74 с.

Таблица 1

### ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ К 1-Й ЧАСТИ ПРОЕКТА

№	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_{цены}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	17	10	32	5	10	30	10	60
2	25	3	10	7	8	5	5	10	60
3	10	40	5	5	5	10	35	5	60
4	100	80	10	10	8	10	60	5	60
5	15	10	8	10	20	10	10	15	100
6	12	18	10	18	5	10	10	60	100
7	15	10	18	15	5	40	10	5	5
8	10	20	30	20	8	40	10	5	5
9	50	10	20	30	20	10	5	10	100
10	5	8	5	10	10	5	10	10	5
11	24	20	16	0	5	10	8	32	50
12	2	4	6	8	10	5	10	40	60
13	1	0,5	1	3	10	5	10	20	60
14	0,2	0,5	1	2	20	4	4	10	5
15	3	7	50	20	10	5	5	1	60
16	100	150	120	300	5	40	60	10	200
17	20	24	30	150	120	10	10	5	100
18	10	4	2	10	60	5	10	10	100
19	4	8	10	5	10	1	10	1	50

Потери в цепи возбуждения ДПТ:

$$\Delta A_B = I_B^2 R_B t_p.$$

Потери в цепи возбуждения АД:

$$\Delta A_B = I^2 (2R_1 + R_2) t_r.$$

где  $t_m$  – время разгона на ступени сопротивления;  $T_{\Delta\omega}$  – электро-механическая постоянная времени на этой ступени.

Расход электроэнергии определяется для каждой ступени отдельно. При установившихся режимах работы, пренебрегая переходными процессами при набросе и сбросе нагрузки, расход электроэнергии:

$$A_{\mu} = U_H I_{ct} t_{\mu},$$

где  $I_{ct}$  – статический ток нагрузки, соответствующий  $P_i$  нагрузочной диаграммы;  $t_{\mu}$  – время приложения нагрузки  $P_i$ .

В режиме динамического торможения двигатель отключается от сети  $A_{\mu} = 0$ .

При торможении противовключением без нагрузки расход электроэнергии:

$$A_T = U_H T_{MT} \left[ -I_{HAC} \left( 1 - e^{-t_r / T_{MT}} \right) \right].$$

Суммарный расход электроэнергии за цикл работы:

$$A = \sum A_{\mu} + \sum A_{\mu} + A_T.$$

Расход электроэнергии в АД для различных режимов может быть определен по кривой  $M(t)$ :

$$A = \sum_{i=1}^n M_{cp} w_0 \Delta t_i.$$

4.2. Потери электроэнергии в якоре ДПТ НВ и в работе АД при пуске без учета механических потерь и потерь в стали могут быть определены по формуле

$$\Delta A_{\mu 2} = I \left( w_0 w_c - \frac{w_c^2}{2} \right) + M_c \left( w_0 t_{\mu} - \int_0^{t_{\mu}} w dt \right).$$

Первый член этого уравнения представляет собой потери, обусловленные разгоном инерционных масс, а второй – наличием момента нагрузки.

Выражение  $\int_0^{t_{\mu}} w dt$  представляет собой площадь, ограниченную кривой  $w(t)$ , осью времени и вертикальной линией с абсциссой  $t_{\mu}$ . Следовательно, заштрихованная площадь:

$$F_{\mu} = w_0 t_{\mu} - \int_0^{t_{\mu}} w dt.$$

Полные потери за цикл работы электропривода:

$$\Delta A = \sum \Delta A_{\mu} + \sum \Delta A_{\mu} + \Delta A_T + \Delta A_B.$$

### 3. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЯ ПО НАГРЕВУ

Для проверки двигателя по нагреву используются методы эквивалентного тока, момента или мощности в зависимости от того, какая из кривых  $I(t)$ ,  $M(t)$  или  $P(t)$  известны. Кривые  $I(t)$  и  $M(t)$  рассчитываются по условиям задания, поэтому следует воспользоваться методом эквивалентного тока или момента (рис. 2.5). Эквивалентный ток определяется по выражению

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i},$$

а эквивалентный момент

$$M_s = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}.$$

Если соблюдаются условия  $I_s \leq I_n$  и  $M_s \leq M_n$ , то двигатель проходит по нагреву.

### 4. РАСЧЁТ РАСХОДА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЗА ЦИКЛ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Расход электроэнергии, проводимой к ДПТ за время работы, в общем виде:

$$A = U_H \int_0^t I(t) dt,$$

Для различных режимов работы аналитические выражения  $I(t)$  отличаются друг от друга, поэтому расчётные формулы для расхода электроэнергии также различны.

Для пуска двигателя расход электроэнергии:

$$A_{п1} = U_H \left[ I_c t_{п1} + T_{\text{ин}} (I_{\text{ном}} - I_c) (1 - e^{-t_{п1}/T_{\text{ин}}}) \right], \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Тогда потери в цепи якоря (ротора) при пуске:

$$\Delta A_{п2} = I (w_a w_c - w_c^2 / 2) + F_{п1} M_c.$$

Зная потери в роторе АД, можно определить потери в статоре на каждой ступени пуска:

$$\Delta A_{п11} = \Delta A_{п21} \frac{R_1}{R_2 + R_{\text{ст}}}.$$

В установившемся режиме потери энергии в якоре ДПТ:

$$\Delta A_{y1} = M_{c1} (w_a - w_{c1}) t_{y1},$$

а потери в АД:

$$\Delta A_{y2} = M_{c1} (w_a - w_{c1}) \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_{\text{ст}}} \right] t_{y1}.$$

Потери в якоре ДПТ НВ для любого режима определяются по формуле

$$\Delta A = \int_0^t I^2 R dt.$$

Для определения  $\Delta A$  необходимо построить кривую  $I^2(t)$  по известной  $I(t)$  и произвести графическое интегрирование.

При динамическом торможении двигателя вхолостую потери энергии в якоре (роторе):

$$\Delta A_{\text{от}2} = \frac{I w_a}{2},$$

а при торможении противовключением:

$$\Delta A_{\text{от}2} = 3 \frac{I w_a}{2}.$$

Потери в статоре АД:

$$\Delta A_{\text{ст}1} = \Delta A_{\text{от}2} \frac{R_1}{R_2 + R_{\text{ст}}}.$$



ми, то нужно задаться новыми значениями  $M_1^*$  и  $M_2^*$  и повторить построение.

4. После построений при номинальном моменте определяем сопротивление резисторов пускового реостата и полные сопротивления якорной цепи на каждой ступени пуска:

$$\begin{aligned} R_{\Pi 1}^* &= ab, & R_{\Pi 1} &= R_{\Pi 1}^* \cdot R_H; & R_1^* &= ad, & R_1 &= R_1^* \cdot R_H \\ R_{\Pi 2}^* &= bc, & R_{\Pi 2} &= R_{\Pi 2}^* \cdot R_H; & R_2^* &= sd, & R_2 &= R_2^* \cdot R_H \end{aligned}$$

### 2.3. Расчёт сопротивлений резисторов торможения

#### 2.3.1. Динамическое торможение

Механическая характеристика и схема включения ДПТ НВ в режиме динамического торможения показана на рис. 2.1 и 2.3. Сопротивление резистора торможения рассчитывается по формуле

$$R_{\text{дт}} = E_{\text{max}} / I_{\text{доп}} - R_{\text{об}},$$

где  $E_{\text{max}}$  – максимальное значение ЭДС двигателя;  $I_{\text{доп}}$  – допустимое значение тока якоря, равное  $2,5 I_H$  ( $M_{\text{доп}} = K\Phi_n I_{\text{доп}}$ ).

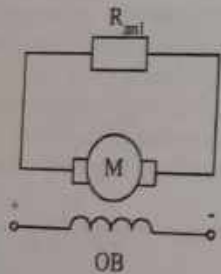


Рис. 2.3. Схема ДПТ НВ при динамическом торможении

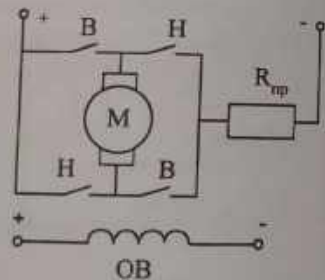


Рис. 2.4. Схема ДПТ НВ при торможении противовключением

Максимальное значение ЭДС  $E_{\text{max}}$  определяем

$$E_{\text{max}} = K\Phi_n \omega_{\text{max}}, \quad (2.4)$$

где  $\omega_{\text{max}}$  – максимально возможное значение скорости вращения. Определяется из условий двигательного режима, предшествующего динамическому торможению, по последнему значению статического момента.

#### 2.3.2. Торможение противовключением

Механическая характеристика и схема включения ДПТ НВ в режиме противовключения показана на рис. 2.1 и 2.4. Сопротивление резистора торможения рассчитывается по формуле

$$R_{\Pi P} = (U_H + E_{\text{max}}) / I_{\text{доп}} - (R_{\text{об}} + R_{\Pi}),$$

где  $E_{\text{max}}$  – максимальное значение ЭДС, которое определяется по (2.4);  $I_{\text{доп}}$  – допустимое значение тока якоря;  $R_{\Pi}$  – полное сопротивление пускового реостата ( $R_{\Pi} = \sum_{i=1}^m R_{\Pi i}$ ).

### 2.4. Расчёт искусственных электромеханических и механических характеристик ДПТ НВ

Искусственные характеристики при пуске можно рассчитать по формулам (2.1) и (2.2), учитывая, что сопротивление цепи якоря

$$R = R_{\text{об}} + R_{\Pi}.$$

Характеристики в режиме динамического торможения рассчитываем по формулам

$$\omega = \frac{I(R_{\text{об}} + R_{\text{дт}})}{K\Phi_n}, \quad \omega = \frac{M(R_{\text{об}} + R_{\text{дт}})}{(K\Phi_n)^2}.$$

Для расчёта характеристик в режиме противовключения пользуемся выражениями

$$\omega = \frac{U_H}{K\Phi_n} - \frac{I(R_{\text{об}} + R_{\Pi} + R_{\Pi P})}{K\Phi_n}, \quad \omega = \frac{U_H}{K\Phi_n} - \frac{M(R_{\text{об}} + R_{\Pi} + R_{\Pi P})}{(K\Phi_n)^2}.$$

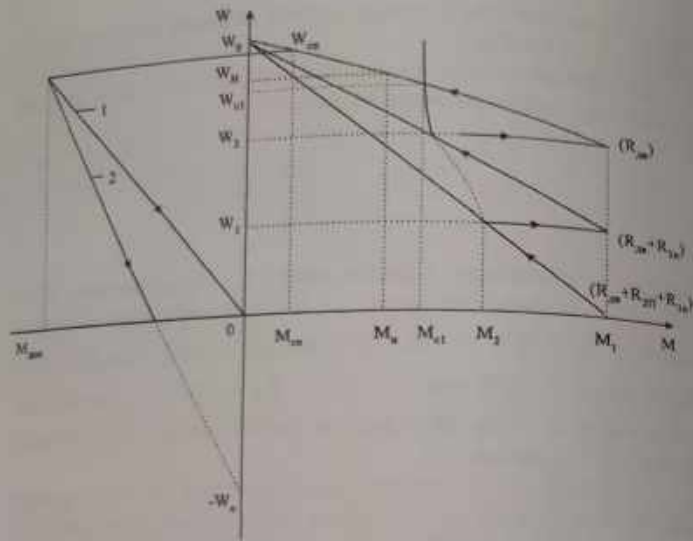


Рис. 2.1. Механические характеристики ДПТ НВ

Необходимо только отметить, что в (2.3) входит момент на валу двигателя, а механическая характеристика построена в функции электромагнитного момента. Но определение  $M_{c1}$  описанным выше способом допустимо ввиду небольшой разницы между электромагнитным моментом и моментом на валу.

Значение  $I_{c1}$  можно определить, пользуясь естественной электромеханической характеристикой  $w = f(I)$ , по значениям  $w_{c1}$ .

## 2.2. Расчёт сопротивлений пусковых резисторов

*Аналитический метод.*

Полагая режим пуска форсированным, задаёмся числом ступеней пускового реостата ( $m = 2, \dots, 5$ ), пусковым моментом  $M_1 = (2, \dots, 2,5) M_H$  и определяем кратность пускового момента и момента переключения  $\lambda$  по формуле

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{R_{0m}^* \cdot M_1^*}}$$

где  $R_{0m}^* = R_{0m} / R_H$  – внутреннее сопротивление ДПТ НВ в относительных единицах ( $R_H = U_H / I_H$ );  $M_1^* = M_1 / M_H$  – пусковой момент в относительных единицах.

Момент переключения  $M_2 = M_1 / \lambda$ .

Сопротивления ступеней пускового реостата и полные сопротивления якорной цепи на каждой ступени пуска рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} R_{0m} = R_{0m}(\lambda - 1) & R_m = R_{0m}\lambda \\ R_{0(m-1)} = R_{0m}\lambda(\lambda - 1) & R_{m-1} = R_{0m}\lambda^2 \\ \dots & \dots \\ R_0 = R_{0m}\lambda^{(m-1)}(\lambda - 1) & R_1 = R_{0m}\lambda^m \end{cases}$$

*Графический метод.*

Метод основан на том, что при номинальном моменте относительные значения падения скорости равны сопротивлениям силовой цепи двигателя в относительных единицах. Для форсированного режима пуска графический метод поясним на примере (рис. 2.2).

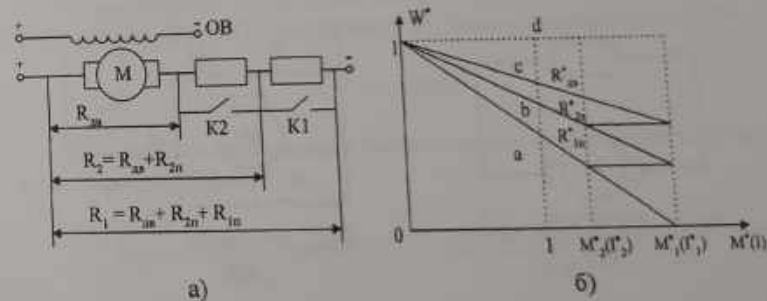


Рис. 2.2. Схема (а) и пусковая диаграмма (б) ДПТ НВ

1. Строим естественную механическую характеристику в относительных единицах  $w^* = f(M^*)$ .
2. Задаёмся пусковым моментом  $M_2^* = (1.1 \dots 1.3) M_{c1}^*$ .
3. Строим пусковую диаграмму для заданного числа ступеней  $m$ . Если при построении моменты  $M_1^*$  и  $M_2^*$  не совпали с заданными.

жительность включения ПВ % =  $\frac{t_p}{t_p + t_{п}} \cdot 100$  % (где  $t_p$  – время работы под нагрузкой), которая может составлять 15, 25, 40 и 60 %. Поэтому при выборе мощности двигателя по каталогу необходимо учесть его стандартную ПВ и пересчитать значение  $P_s$  по формуле

$$P_{эст} = \frac{P_s}{\sqrt{ПВ_{СТ}}}$$

Затем по каталогу выбирается двигатель из условия, что  $P_{эст} \leq P_H$  ( $P_H$  – номинальная мощность двигателя).

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

### 2.1. Расчёт и построение естественных электромеханических $w = f(I)$ и механических $xw = f(M)$ характеристик

Данные зависимости описываются следующими выражениями:

$$w = \frac{U_H}{K\Phi_H} - \frac{IR_{эм}}{K\Phi_H}, \quad (2.1)$$

$$w = \frac{U_H}{K\Phi_H} - \frac{MR_{эм}}{(K\Phi_H)^2}, \quad (2.2)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение двигателя;  $K\Phi_H$  – произведение конструктивного коэффициента двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) и магнитного потока;  $I$  – ток якоря;  $M = IK\Phi_H$  – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;  $R_{эм}$  – внутреннее сопротивление двигателя.

Произведение  $K\Phi_H$  можно определить по паспортным данным из уравнения (2.1):

$$K\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{эм}}{w_H}$$

где  $w_H$  – номинальное значение угловой скорости вращения двигателя ( $w_H = 2\pi n_H/60$ ).

Внутреннее сопротивление ДПТ НВ, приведённое к рабочей температуре, рассчитывается по формуле

$$R_{эм} = (R_a + R_{дп}) \cdot \frac{273^\circ + t_p^\circ}{273^\circ + t_3^\circ} + R_{щ}$$

где  $R_a$  – сопротивление обмотки якоря;  $R_{дп}$  – сопротивление обмоток дополнительных полюсов;  $t_p$  – рабочая температура (в данном случае  $t_p^\circ = 70^\circ\text{C}$ );  $t_3^\circ$  – температура, при которой задаются сопротивления ( $t_3^\circ = 15^\circ\text{C}$  или  $t_3^\circ = 20^\circ\text{C}$ );  $R_{щ} = \Delta U/I_H$  – сопротивление щёточных контактов ( $\Delta U$  – падение напряжения на щётках, которое принимается равным 2 В).

Поскольку все статические характеристики, без учёта насыщения магнитопровода, представляют собой прямые линии (рис. 2.1), то они могут быть построены по двум точкам, одна из которых соответствует скорости идеального холостого хода ( $I = 0$  или  $M = 0$  и  $w = w_0 = U_H/K\Phi_H$ ), а другая – работе при номинальном режиме работы ( $I = I_H$  или  $M = M_H$  и  $w = w_H$ ).

Мощность нагрузки  $P$  связана с моментом на валу двигателя соотношением  $P = Mw$ , пользуясь которым можно определить значение  $M_c$  для каждой нагрузки. Для этого на координатной плоскости, где построена естественная механическая характеристика  $w = f(M)$ , нужно построить  $i$ -е количество вспомогательных кривых по уравнению

$$M = \frac{P_i}{w}, \quad (2.3)$$

где  $P_i$  –  $i$ -е значение мощности нагрузки ( $i = 1, \dots, n$ );  $w$  – скорость вращения двигателя, которая задается в пределах примерно (0,7 ... 1,3)  $w_H$ .

Точка пересечения  $i$ -й вспомогательной кривой с естественной характеристикой и даёт значение  $M_{ci}$ . На рис. 2.1 показано, как определяется значение  $M_{ci}$ .

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ»

При выполнении курсовой работы по дисциплине «Судовые электроприводы» следует обратить внимание на следующие разделы теоретического курса: электроприводы постоянного тока; расчет электроприводов; режимы работы электроприводов; автоматизированные электроприводы постоянного тока.

В результате этой работы должна сформироваться компетенция ПК-23 – способность и готовность разработать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом физико-технических, механико-технических и других требований.

### ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Разработать и рассчитать разомкнутую систему электропривода механизма, имеющего заданную нагрузочную диаграмму  $P(t)$ . При разработке необходимо предусмотреть возможность запуска двигателя в несколько ступеней и остановку электрическим торможением. Вид торможения задаётся вариантом курсового проекта. Запуск двигателя производится под нагрузкой  $P_1$ , затем на естественной характеристике следует работа под нагрузкой в соответствии с графиком  $P(t)$ . Торможение осуществляется на холостом ходу. Момент инерции механизма  $J_{max}$ , приведённый к валу двигателя, принять равным  $2J_{об}$ .

Варианты задания приведены в табл. 1.

Курсовой проект должен включать в себя:

- 1) построение нагрузочной диаграммы по исходным данным;
- 2) расчёт мощности и выбор двигателя по каталогу;
- 3) расчёт сопротивления пусковых резисторов и резисторов торможения;
- 4) расчёт и построение статических электромеханических и механических (для асинхронных двигателей только механических) характеристик во всех режимах работы электропривода;
- 5) проверку двигателя по нагреву методом эквивалентного тока или эквивалентного момента;
- 6) расчёт расхода и потерь электроэнергии за цикл работы электропривода;

- 7) разработку принципиальной схемы управления электроприводом и описание её работы;
- 8) спецификацию схемы управления;
- 9) заключение.

### 1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Исходной информацией для расчёта и выбора мощности двигателя является нагрузочная диаграмма механизма  $P(t)$ , данные которой для каждого варианта приведены в табл. 1. Пример нагрузочной диаграммы изображён на рис. 1.1.

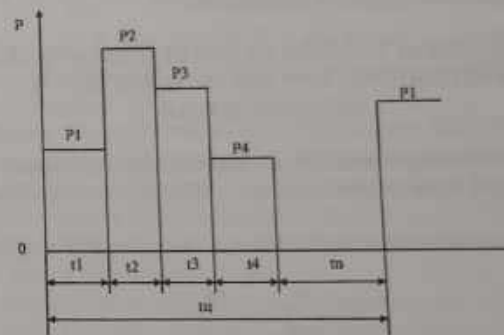


Рис. 1.1. Нагрузочная диаграмма

Расчёт мощности двигателя производится по эквивалентной мощности за цикл работы электропривода по формуле [1]:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_n}}$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -й нагрузки ( $i = 1, \dots, n$ );  $t_i$  – время работы под  $i$ -й нагрузкой;  $t_n$  – время паузы.

Двигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима, рассчитываются и выпускаются на стандартную продол-