

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

В. В. Логвин, В. В. Брель, И. В. Дорощенко

ЭЛЕКТРОПРИВОД РАБОЧИХ МАШИН

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»
специализаций 1-43 01 03 01 «Электроснабжение
промышленных предприятий» и 1-43 01 03 05
«Электроснабжение предприятий агропромышленного
комплекса» дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2015

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73
Л69

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 24.11.2014 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Ю. А. Рудченко

Логвин, В. В.
Л69 Электропривод рабочих машин : практикум по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализаций 1-43 01 03 01 «Электроснабжение промышленных предприятий» и 1-43 01 03 05 «Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса» днев. формы обучения / В. В. Логвин, В. В. Брель, И. В. Дорощенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 38 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-277-9.

Рассмотрены задачи расчета типовых электроприводов. Предложены доступные к пониманию конкретные примеры, которые иллюстрируют подход к выполнению задач.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» дневной формы обучения.

**УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73**

ISBN 978-985-535-277-9

© Логвин В. В., Брель В. В., Дорощенко И. В., 2015
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2015

ЗАДАЧА 1

Определение величин пусковых сопротивлений двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Рабочая машина приводится во вращение двигателем постоянного тока независимого возбуждения серии Д. Используя данные, приведенные в табл. 1, для соответствующего варианта задания определить:

1. Величины пусковых сопротивлений отдельных ступеней. Полное сопротивление пускового реостата (аналитически и графически).
2. Скорости переключений, время разгона на отдельных ступенях, полное время пуска.
3. Рассчитать и настроить зависимости $\omega = f(t)$ за весь период пуска.

Указание. Пуск производится в 4 этапа. Величина M_c приведена к валу двигателя. Моментом инерции можно пренебречь.

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}} = a;$$

$$\frac{M_c}{M_{\text{ном}}} = \frac{I_c}{I_{\text{ном}}} = b.$$

Методические указания к задаче 1

I. Для графического определения величин пусковых сопротивлений ДПТ необходимо построить пусковую диаграмму.

Сначала строится естественная электромеханическая или механическая характеристика по паспортным данным двигателя. Как известно, искомая характеристика представляет собой прямую линию, которую можно построить по двум точкам: номинального режима и холостого хода.

Таблица 1

Вариант	Величины						
	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$J_{\text{дв}}$, кг · м ²	$n_{\text{ном}}$, об/мин	a	b
1	8	220	44	0,3	840	2	0,7
2	12	220	65	0,423	770	2,1	0,8

Вариант	Величины						
	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$J_{\text{дв}}$, кг · м ²	$n_{\text{ном}}$, об/мин	a	b
3	16	220	86	0,8	690	2,2	0,7
4	22	220	116	1	650	2,3	0,9
5	37	440	96	2	575	2,4	0,7
6	55	440	141	3,65	550	2,5	0,8
7	75	440	176	7	520	2,1	0,9
8	18	220	94	0,6	1190	2,2	0,8
9	24	220	124	0,9	1108	2,3	0,7
10	47	220	238	2,4	800	2,4	0,9
11	8	220	44	0,3	840	2,5	0,9
12	12	220	65	0,423	770	2,4	0,7
13	16	220	86	0,8	690	2,3	0,8
14	22	220	116	1	650	2,2	0,9
15	37	440	96	2	575	2,1	0,8
16	55	440	141	3,65	550	2	0,7
17	75	440	176	7	520	2,4	0,9
18	18	220	94	0,6	1190	2,3	0,7
19	24	220	124	0,9	1108	2,2	0,8
20	47	220	238	2,4	800	2,1	0,7
21	8	220	44	0,3	840	2,4	0,8
22	12	220	65	0,423	770	2,3	0,7
23	16	220	86	0,8	690	2,2	0,8
24	22	220	116	1	650	2,1	0,7
25	37	440	96	2	575	2,5	0,9
26	55	440	141	3,65	550	2,4	0,7
27	75	440	176	7	520	2,3	0,8
28	18	220	94	0,6	1190	2,2	0,9
29	24	220	124	0,9	1108	2,1	0,8
30	47	220	238	2,4	800	2	0,7

1. Для точек номинального режима определяем:

а) номинальную угловую скорость

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi n_{\text{ном}}}{60}, \text{ рад/с};$$

б) номинальный момент

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}, \text{ Н} \cdot \text{ м};$$

в) номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}, \text{ Ом}.$$

2. По приближенной формуле находим сопротивление якоря двигателя:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 R_{\text{НОМ}} (1 - \eta_{\text{НОМ}}), \text{ Ом},$$

где $\eta_{\text{НОМ}}$ – КПД двигателя, $\eta = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}}$.

3. Из уравнения баланса напряжения, приложенного к двигателю, определим значение $k \Phi_{\text{НОМ}}$:

$$k \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{(U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{я}})}{\omega_{\text{НОМ}}}.$$

4. Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \Phi_{\text{НОМ}}}, \text{ рад/с}.$$

5. По координатам точек холостого хода ($\omega_0, 0$) и номинального режима ($\omega_{\text{НОМ}}, I_{\text{НОМ}}$) на рис. 1 построена естественная электромеханическая характеристика. Механическая естественная характеристика будет точно такая же.

6. При использовании четырех ступеней пускового резистора (см. рис. 1) строим пусковую диаграмму в следующем порядке:

а) рассчитывается допустимый ток при пуске

$$I_{\text{п}} = I_1 = a I_{\text{НОМ}}, \text{ А};$$

б) определяется значение тока переключения

$$I_2 \geq (1,1-1,8)I_c;$$

в) строится первая искусственная характеристика I по двум точкам: холостого хода ($\omega_0, 0$) и режима короткого замыкания ($0, I_1$);

г) через точки ($0, I_2$) и ($0, I_1$) проводятся вертикальные линии, соответствующие токам I_2 и I_1 ;

д) характеристика I пересекает вертикаль с абсциссой I_2 в точке 2, через которую проводим горизонталь 2–3 до пересечения вертикали с абсциссой I_1 . Через точки 3 и ω_0 проводим искусственную характеристику 2, которая пересечет вертикаль с абсциссой I_2 в точке 4. Далее проводим горизонтали 4–5, 6–7, 8–9, через точки 5, 7 и ω_0 строим реостатные характеристики 3, 4. При правильном подборе величины тока I_2 горизонталь 8–9 должна проходить через точку пересечения естественной характеристики с вертикалью, имеющей абсциссу I_1 . Если горизонталь 8–9 не проходит через указанную точку, то необходимо построение пусковой диаграммы повторить заново, изменив значение тока переключения I_2 в пределах $(1,1-1,8)I_c$. Например, если горизонталь 8–9 проходит ниже указанной точки пересечения, то следует уменьшить величину тока I_2 и наоборот.

7. С помощью метода отрезков находим сопротивление секций пускового резистора. Для этого восстанавливаем вертикаль (см. рис. 1) в точке с абсциссой I_H и через отношения длин отрезков определяем:

$$R_{4-3} = \frac{k l}{ab} R_{\text{НОМ}}, \text{ Ом};$$

$$R_{3-2} = \frac{k e}{ab} R_{\text{НОМ}}, \text{ Ом};$$

$$R_{2-1} = \frac{ed}{ab} R_{\text{НОМ}}, \text{ Ом};$$

$$R_{1-\text{я}} = \frac{dc}{ab} R_{\text{НОМ}}, \text{ Ом};$$

$$R_{\text{я}} = \frac{bc}{ab} R_{\text{НОМ}}, \text{ Ом}.$$

8. Полное сопротивление пускового реостата:

$$R_{\Sigma} = R_{1-\text{я}} + R_{2-1} + R_{3-2} + R_{3-4}, \text{ Ом}.$$

9. Сопротивление якорной цепи двигателя:

$$R'_{\Sigma} = R_{\Sigma} + R_{\text{я}}, \text{ Ом}.$$

10. Скорости переключений (см. рис. 1):

$\omega_1; \omega_2; \omega_3; \omega_4$ (при токе переключения I_2).

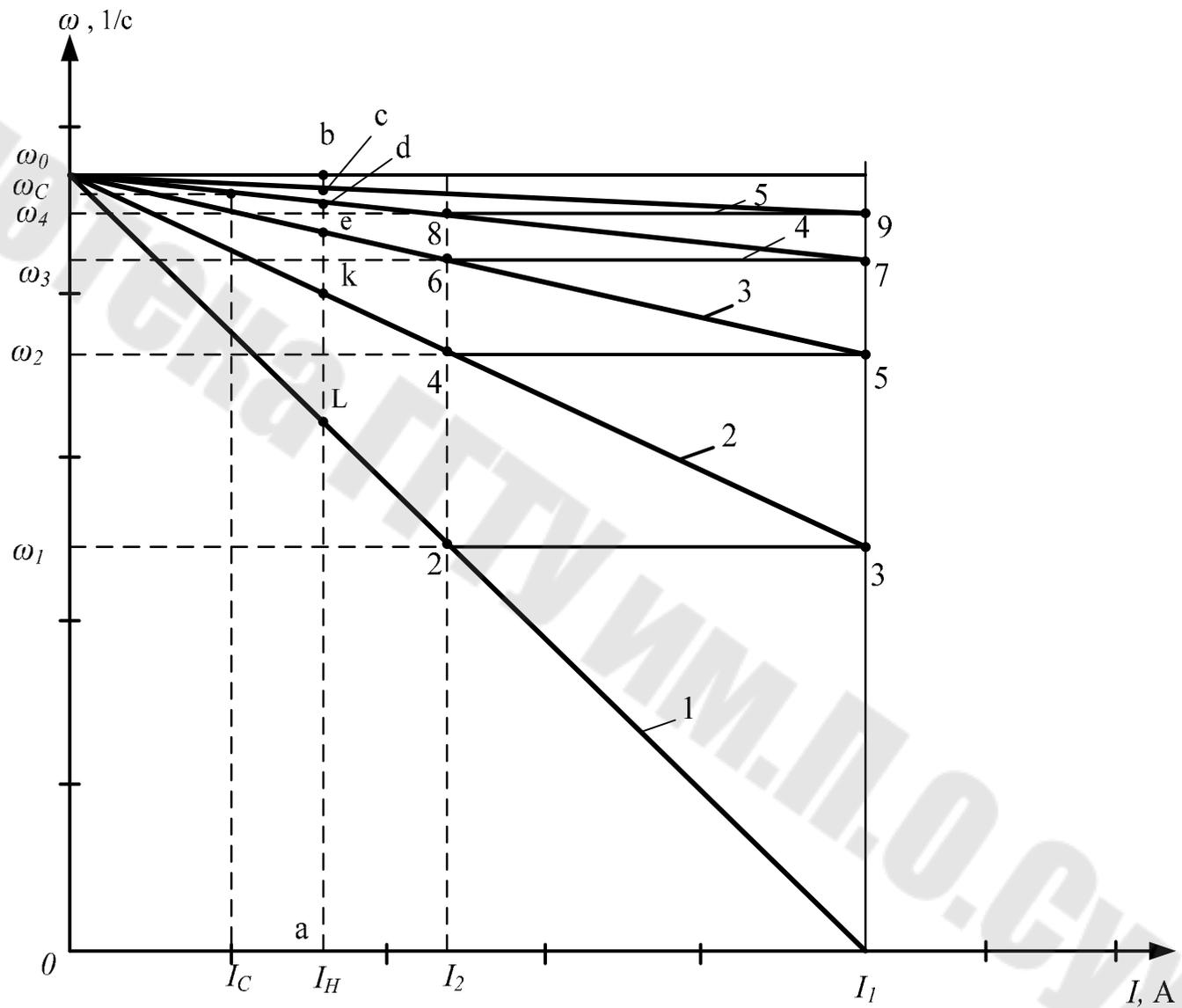


Рис. 1. Пусковые реостатные характеристики ДПТ НВ

II. Аналитический метод определения пусковых сопротивлений и скоростей переключений.

1. Определяется полное сопротивление якорной цепи двигателя, ограничивающее пусковой ток до значения $I_{\text{п}} = I_1$ (см. рис. 1):

$$R_m = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_1}, \text{ Ом.}$$

2. Находим отношение пускового тока I_1 к току переключения I_2 :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_{\text{я}}}},$$

где m – число ступеней пускового резистора; $m = 4$; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, Ом, определенное по выражению

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 R_{\text{НОМ}} (1 - \eta_{\text{НОМ}}).$$

3. Сопротивления ступеней пускового реостата:

$$R_1 = \lambda R_{\text{я}}, \text{ Ом;}$$

$$R_2 = \lambda^2 R_{\text{я}}, \text{ Ом;}$$

$$R_3 = \lambda^3 R_{\text{я}}, \text{ Ом;}$$

$$R_4 = \lambda^4 R_{\text{я}}, \text{ Ом.}$$

4. Полное сопротивление пускового реостата:

$$R_{\Sigma} = R_4 - R_{\text{я}}, \text{ Ом.}$$

5. Ток переключения:

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda}, \text{ А.}$$

6. Сопротивление отдельных секций:

$$R_{1-\text{я}} = R_1 - R_{\text{я}}, \text{ Ом;}$$

$$R_{2-1} = R_2 - R_1, \text{ Ом;}$$

$$R_{3-2} = R_3 - R_2, \text{ Ом;}$$

$$R_{4-3} = R_4 - R_3, \text{ Ом.}$$

7. Находим скорости переключений (см. рис. 1):

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_2 R_4}{k \Phi_{\text{НОМ}}}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_2 = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_2 R_3}{k \Phi_{\text{НОМ}}}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_3 = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_2 R_2}{k \Phi_{\text{НОМ}}}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_4 = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_2 R_1}{k \Phi_{\text{НОМ}}}, \text{ рад/с}.$$

III. Определение времени разгона на отдельных ступенях осуществляется исходя из следующей формулы:

$$t_x = T_{\text{МХ}} \ln \frac{I_{\text{max}} - I_c}{I_{\text{min}} - I_c} = B T_{\text{МХ}}, \text{ с},$$

где $T_{\text{МХ}}$ – электромеханическая постоянная времени на любой ступени разгона, с;

$$T_{\text{М}} = \frac{JR}{(k \Phi_{\text{НОМ}})^2}, \text{ с},$$

где J – момент инерции двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; R – сопротивление цепи якоря, Ом; I_{max} – максимальное значение тока при пуске, А, $I_{\text{max}} = I_1$; I_{min} – минимальное значение тока, А (ток переключения, $I_{\text{min}} = I_2$); I_c – ток, соответствующий моменту сопротивления, А.

Следует помнить, что при реостатном пуске, при переходе на каждую новую ступень меняется сопротивление цепи якоря и вместе с тем изменяется электромеханическая постоянная $T_{\text{М}}$.

Определить $T_{\text{М}}$ и t на отдельных ступенях:

$$T_{\text{М1}} = \frac{JR_4}{(k \Phi_{\text{НОМ}})^2}; \quad T_{\text{М2}} = \frac{JR_3}{(k \Phi_{\text{НОМ}})^2};$$

$$T_{\text{М3}} = \frac{JR_2}{(k \Phi_{\text{НОМ}})^2}; \quad T_{\text{М4}} = \frac{JR_1}{(k \Phi_{\text{НОМ}})^2};$$

$$T_{M5} = \frac{JR_{я}}{(k \Phi_{НОМ})^2},$$

где R_1, R_2, \dots – сопротивления якорной цепи на первой, второй и т. д. ступенях.

$$t_1 = BT_{M1}; \quad t_2 = BT_{M2};$$

$$t_3 = BT_{M3}; \quad t_4 = BT_{M4};$$

$$t_5 = BT_{M5},$$

где $B = \ln \frac{I_{\max} - I_c}{I_{\min} - I_c}$; $T_{M5} = T_{M.я}$ – постоянная времени якоря двигателя, с;

t_1, t_2, \dots – время разгона двигателя на отдельных ступенях.

Суммарное время разгона (с некоторой неточностью для последней ступени, так как $I_{\min} > I_c$) будет равно

$$t_{\Pi} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \text{ с.}$$

Приведенная формула дает нам время разгона от неподвижного состояния до скорости, соответствующей на естественной характеристике моменту переключения. Поэтому к найденному значению t_{Π} следует прибавить время разгона двигателя на естественной характеристике от I_{\min} до I_c , которое может быть принято равным $4T_{M.я}$. Таким образом, уточняя формулу, получим:

$$t'_{\Pi} = t_{\Pi} + 4T_{M.я}, \text{ с.}$$

IV. Построение зависимости $\omega = f(t)$ за весь период пуска.

Процесс реостатного пуска ДПТ предполагает, что в процессе пуска обеспечивается автоматическое переключение ступеней пускового реостата таким образом, что начальное и конечное значения тока (момента) двигателя остаются неизменными (см. рис. 1). В начальный момент пуска в якорную цепь введено полное сопротивление пускового реостата, которое ограничивает пусковой ток значением $I_{я} = I_1$ (пусковая характеристика 1). При увеличении скорости до значения ω_1 замыканием ключа К4 выводится первая ступень пускового реостата, ток вновь возрастает до I_1 , продолжается пуск по характеристике 2, далее при достижении значения тока переключения I_2 замыкается ключ К3 и т. д.

Уравнение, согласно которому происходит процесс нарастания скорости, для всех ступеней одинаково:

$$\omega_i = (\omega_{\text{нач}i} - \omega_{\text{уст}i}) e^{-t/T_{mi}} + \omega_{\text{уст}}, \text{ рад/с},$$

где $\omega_{\text{нач}i}$ – начальная скорость на данном участке, рад/с; $\omega_{\text{нач}1} = 0$, $\omega_{\text{нач}2} = \omega_1$, $\omega_{\text{нач}3} = \omega_2$ и т. д.; $\omega_{\text{уст}i}$ – установившееся значение скорости на данном участке, которое определяется как точка пересечения электромеханической (механической) характеристики с вертикалью, имеющей абсциссу $I_c(M_c)$, рад/с; T_{mi} – электромагнитная постоянная времени, с.

Скорость $\omega_{\text{уст}}$ на каждом участке можно найти аналитически:

$$\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - \frac{M_c(\omega_0 - \omega_j)}{M_{кз}}, \text{ рад/с},$$

где ω_0 – скорость холостого хода, рад/с; M_c – момент сопротивления, Н·м, $M_c = bM_{\text{ном}}$; $M_{кз}$ – момент короткого замыкания, Н·м, $M_{кз} = aM_{\text{ном}}$; ω_j – скорость, соответствующая моменту переключения пусковых резисторов, рад/с. При включении двигателя, на первой ступени $\omega_j = 0$, на второй – $\omega_j = \omega_1$, на третьей – $\omega_j = \omega_2$ и т. д.

Для отдельных ступеней можно записать:

$$\omega_{\text{уст}1} = \omega_0 - D\omega_0, \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{уст}2} = \omega_0 - D(\omega_0 - \omega_1), \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{уст}3} = \omega_0 - D(\omega_0 - \omega_2), \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{уст}4} = \omega_0 - D(\omega_0 - \omega_3), \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{уст}5} = \omega_0 - D(\omega_0 - \omega_4), \text{ рад/с},$$

где $D = \frac{M_c}{M_{кз}}$.

Нарастание скорости для отдельных ступеней имеет вид:

$$\omega_{x1} = \omega_{\text{уст}1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}} \right), \text{ рад/с};$$

$$\omega_{x2} = (\omega_1 - \omega_{уст2})e^{\frac{-t}{T_{M2}}} + \omega_{уст2}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_{x3} = (\omega_2 - \omega_{уст3})e^{\frac{t}{T_{M3}}} + \omega_{уст3}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_{x4} = (\omega_3 - \omega_{уст4})e^{\frac{t}{T_{M4}}} + \omega_{уст4}, \text{ рад/с};$$

$$\omega_{x5} = (\omega_4 - \omega_{уст5})e^{\frac{t}{T_{M5}}} + \omega_{уст5}, \text{ рад/с},$$

где $\omega_{x1}, \omega_{x2}, \dots$ – текущие координаты скоростей на первом, втором и т. д. ступенях; $\omega_1, \omega_2, \dots$ – скорости переключения.

На рис. 2 приведена зависимость $\omega = f(t)$, построенная за весь период пуска двигателя.

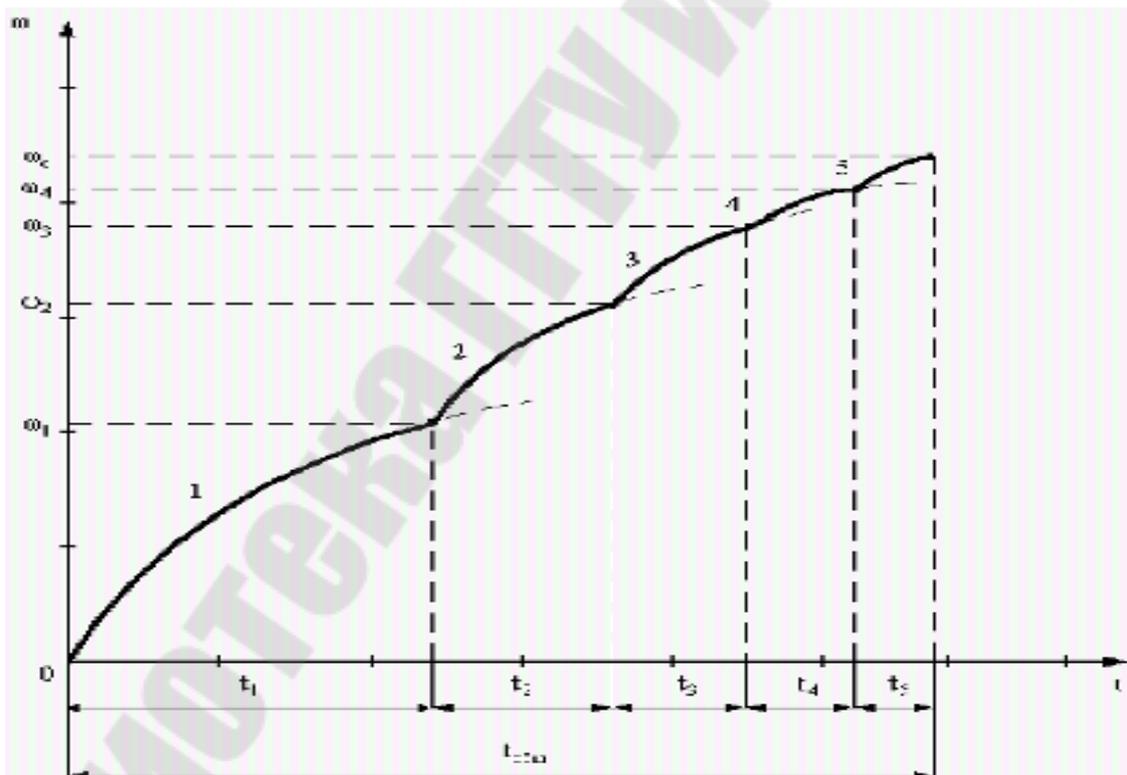


Рис. 2. Зависимость $\omega = f(t)$

ЗАДАЧА 2

Выбор двигателя для рабочего механизма и определение времени пуска

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором через редуктор приводит во вращение исполнительный механизм. Синхронная частота вращения двигателя n_0 ; частота вращения вала исполнительного механизма (при синхронной частоте вращения двигателя) n_m ; статический момент сопротивления на валу исполнительного механизма $M_{см}$; момент инерции исполнительного механизма J_m ; коэффициент полезного действия передачи $\eta_{пер}$. Режим работы – продолжительный. Числовые значения величин приведены в табл. 2.

Необходимо:

1. Определить требуемую мощность двигателя и выбрать двигатель (см. приложение).
2. Пренебрегая моментом инерции редуктора, определить время разгона привода.

Примечание. Статический момент сопротивления в процессе разгона считать неизменным, равным M_c .

Методические указания к задаче 2

1. Время разгона (пуска) электропривода определяется путем решения уравнения движения

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где M – момент, развиваемый двигателем, Н · м; M_c – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя, Н · м; J – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя, кг · м²; ω – угловая скорость вала двигателя, рад/с.

Таблица 2

Вариант	Величины				
	$M_{см}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_m, \text{об/мин}$	$\eta_{пер}, \%$	$J_m, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$n_0, \text{об/мин}$
1	1600	100	80	210	1500
2	1000	200	85	180	1000
3	970	250	87	160	750
4	1100	150	83	320	3000

Вариант	Величины				
	$M_{см}, Н \cdot м$	$n_m, об/мин$	$\eta_{пер}, \%$	$J_m, кг \cdot м^2$	$n_0, об/мин$
5	1500	220	86	200	1000
6	600	300	90	170	1500
7	1300	175	84	160	750
8	850	320	82	190	1000
9	750	340	83	215	3000
10	1200	160	85	205	1500
11	1600	100	80	210	1000
12	1000	200	85	180	750
13	970	250	87	160	3000
14	1100	150	83	320	1000
15	1500	220	86	200	1500
16	600	300	90	170	750
17	1300	175	84	160	1000
18	850	320	82	190	3000
19	750	340	83	215	1500
20	1200	160	85	205	750
21	1600	100	80	210	750
22	1000	200	85	180	3000
23	970	250	87	160	1000
24	1100	150	83	320	1500
25	1500	220	86	200	750
26	600	300	90	170	1000
27	1300	175	84	160	3000
28	850	320	82	190	1500
29	750	340	83	215	1500
30	1200	160	85	205	1000

Аналитическое решение данного уравнения сильно затруднено, так как динамический момент имеет сложную зависимость от скорости. Когда законы изменения моментов не заданы аналитически или точное решение уравнения невозможно, используются приближенные способы интегрирования: численные и графоаналитические. Одним из наиболее простых является графоаналитический метод Эйлера, который предусматривает замену дифференциалов их приращениями. Тогда уравнение движения может быть записано в виде

$$M - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

Для пользования этим уравнением ось скорости разбивается на ряд интервалов $\Delta\omega_k$, на которых моменты двигателя M_k и статического момента $M_{ск}$ принимаются постоянными. Тогда

$$\Delta t_k = \frac{J \Delta\omega_k}{M_k - M_{ск}},$$

где Δt_k – время продолжительности к-го этапа разгона; $\Delta\omega_k$ – приращение угловой скорости на к-м этапе, причем $\Delta\omega_k$ могут быть различными по значению на разных этапах; M_k , $M_{ск}$ – соответственно моменты двигателя и статического момента на к-м этапе, величины неизменные на данном этапе.

Подсчитав продолжительность для каждого этапа и складывая рассчитанные интервалы времени всех этапов, получим время разгона привода

$$t_{пуск} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_N.$$

2. Для графоаналитического решения задачи определения времени разгона привода пользуются механической характеристикой асинхронного двигателя.

Рабочая часть механической характеристики асинхронного двигателя (область малых скольжений, $0 \leq S < S_{кр}$) удовлетворительно воспроизводится формулой Клосса:

$$M = \frac{2 M_{\max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}},$$

где M_{\max} – максимальный (критический) момент двигателя, Н·м; $S_{кр}$ – критическое скольжение, %; S – текущее значение скольжения, %.

Так как на время разгона существенно влияет вид механической характеристики в области больших скольжений ($1 \geq S \geq S_{кр}$), то для определения моментов при значении скольжения больших критического следует пользоваться выражением

$$M = \frac{2 M_{\max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} + bS,$$

где b – коэффициент, определяемый из условия пуска, когда $S = 1$.

Для пускового момента последнее выражение имеет вид:

$$M_{\text{п}} = \frac{2 M_{\text{max}}}{\frac{1}{S_{\text{кр}}} + S_{\text{кр}}} + b,$$

откуда

$$b = M_{\text{п}} - \frac{2 M_{\text{max}}}{\frac{1}{S_{\text{кр}}} + S_{\text{кр}}}.$$

Значение пускового момента $M_{\text{п}}$ определяется через кратность пускового момента относительно номинального $\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$, которая приводится в справочниках (см. приложение).

Пример

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором через редуктор приводит во вращение вал исполнительного механизма. Номинальная мощность двигателя $P_{\text{н}} = 22$ кВт; синхронная частота вращения $n_0 = 3000$ об/мин; частота вращения вала исполнительного механизма (при синхронной частоте вращения двигателя) $n_{\text{м}} = 1000$ об/мин. Момент статического сопротивления механизма задан следующей зависимостью от частоты вращения:

$$M_{\text{см}} = 48,6 + 14,77 \cdot 10^{-4} \omega^2, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент инерции механизма $J = 4,0$ кг \cdot м². Коэффициент полезного действия передачи $\eta_{\text{пер}} = 0,9$.

Пренебрегая моментом инерции шестерен, определить время разгона привода.

Решение

1. Построим график механической характеристики двигателя. Для этого предварительно определим:

а) номинальную угловую скорость

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \pi n_{\text{ном}}}{60} = \frac{2 \pi \cdot 2915}{60} = 305,1 \text{ рад/с}$$

($n_{\text{ном}}$ определено по таблице приложения);

б) номинальный момент

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{22000}{305,1} = 71,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

в) максимальный момент.

В таблице (см. приложение) для используемого двигателя указана кратность максимального момента относительно номинального:

$$K_M = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2,2.$$

Следовательно, $M_{\max} = 2,2 M_H = 2,2 \cdot 71,1 = 158,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$

г) пусковой момент.

По таблице (см. приложение) кратность пускового момента относительно номинального $\frac{M_{\text{п}}}{M_H} = 1,3$. Следовательно, $M_{\text{п}} = 1,3 \cdot M_H = 1,3 \cdot 71,1 = 93,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$

д) скольжение при номинальной нагрузке

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{314 - 305,1}{314} = 0,028;$$

е) критическое скольжение

$$S_{\text{кр}} = S_H \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right) = 0,028 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,12.$$

Критическая угловая скорость $\omega_{\text{кр}} = 276,3 \text{ рад/с}.$

Находим величины моментов, развиваемых двигателем при различных значениях скольжения. Вычисления производим по двум формулам (для $S < S_{\text{кр}}$) и (для $S > S_{\text{кр}}$). Значение коэффициента b получим по формуле

$$b = M_{\text{п}} - \frac{2 M_{\max}}{1/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}} = 93,7 - \frac{2 \cdot 158,6}{1/0,12 + 0,12} = 56,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Результат вычислений сведем в табл. 3.

Таблица 3

S	0	0,028	0,1	0,12	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
ω , рад/с	314	305	283	276	251	220	188	126	63	31,5	0
M , Н · м	0	72,1	156	158,1	151,1	126,3	109,8	94,7	91,5	92,1	93,7
M_c , Н · м	72,0	69,0	61,7	59,8	52,6	44,5	37,4	26,6	20,2	18,5	18,0

Используя 1 и 3 строки табл. 3, построим механическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(M)$ (рис. 3).

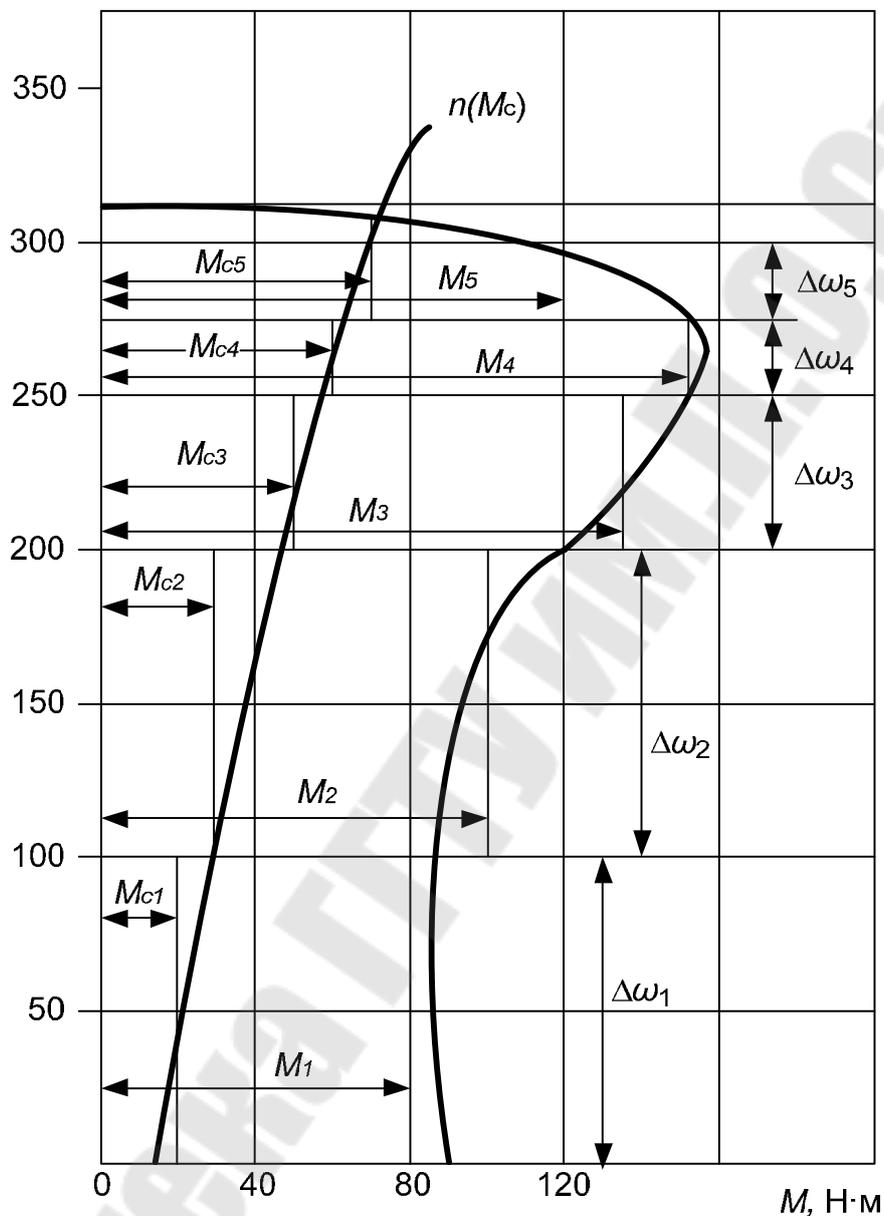


Рис. 3. Механическая характеристика АД и исполнительного механизма

2. Получим выражение для статического сопротивления, приведенного к валу двигателя:

$$M_c = M_{cm} \frac{\omega_M}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_{пер}} = (48,6 + 14,77 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^2) \frac{1000}{3000} \cdot \frac{1}{0,9} =$$

$$= 18 + 5,47 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^2 \text{ H} \cdot \text{m}.$$

Определим значение момента статического сопротивления, приведенного к валу двигателя, M_c для различных значений частоты вращения (результаты расчета – 4-я строка табл. 3) и построим график $\omega = f(M_c)$ (см. рис. 3).

3. Точка пересечения графиков $\omega = f(M)$ и $\omega = f(M_c)$ определяет установившуюся угловую скорость двигателя $\omega_{уст} = 306$ рад/с.

4. Разобьем процесс пуска на этапы. Деление на этапы следует выполнять так, чтобы легче и возможно точнее определялись средние за этап значения моментов M_k , развиваемых двигателем, и $M_{ск}$ статического сопротивления. Исходя из этого, разобьем процесс пуска на пять этапов:

- 1 – от $\omega = 0$ до $\omega = 105$ рад/с;
- 2 – от $\omega = 105$ рад/с до $\omega = 210$ рад/с;
- 3 – от $\omega = 210$ рад/с до $\omega = 251$ рад/с ;
- 4 – от $\omega = 251$ рад/с до $\omega = 283$ рад/с;
- 5 – от $\omega = 283$ рад/с до $\omega = 306$ рад/с.

Приращения угловой скорости $\Delta\omega_k$, а также величины средних за этап значений моментов M_k и $M_{ск}$ указаны в табл. 4.

5. Находим момент инерции системы, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_d + J_m \left(\frac{\omega_m}{\omega_d} \right)^2,$$

где J_d – момент инерции двигателя.

Таблица 4

Этапы	1	2	3	4	5
$\Delta\omega_k$, рад/с	105	105	41	32	23
M_k , Н·м	92,5	102	137	157	118
$M_{ск}$, Н·м	20	32	47	57	65,4
Δt_k , с	0,703	0,728	0,227	0,153	0,213

По таблице примем $J_d = 4,25 \cdot 10^{-2}$ кг·м².

Тогда

$$J = 4,25 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot \left(\frac{105}{314} \right)^2 = 48,69 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

6. Определим Δt_k (продолжительность этапов). Результаты вычислений приведены в табл. 4.

7. Определим время разгона привода:

$$\begin{aligned} t_{\text{пуск}} &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 = \\ &= 0,703 + 0,728 + 0,227 + 0,153 + 0,213 = 2,024 \text{ с.} \end{aligned}$$

ЗАДАЧА 3

Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением

Исходные данные к задаче приведены в табл. 5.

Необходимо:

1. Рассчитать и построить электромеханическую и механическую характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

2. Графическим методом определить величины сопротивлений пусковых реостатов для пуска ДПТ в две ступени.

Методические указания к решению задачи 3

Основной особенностью ДПТ последовательного возбуждения является включение его обмотки возбуждения последовательно с обмоткой якоря, вследствие чего ток якоря одновременно является и током возбуждения.

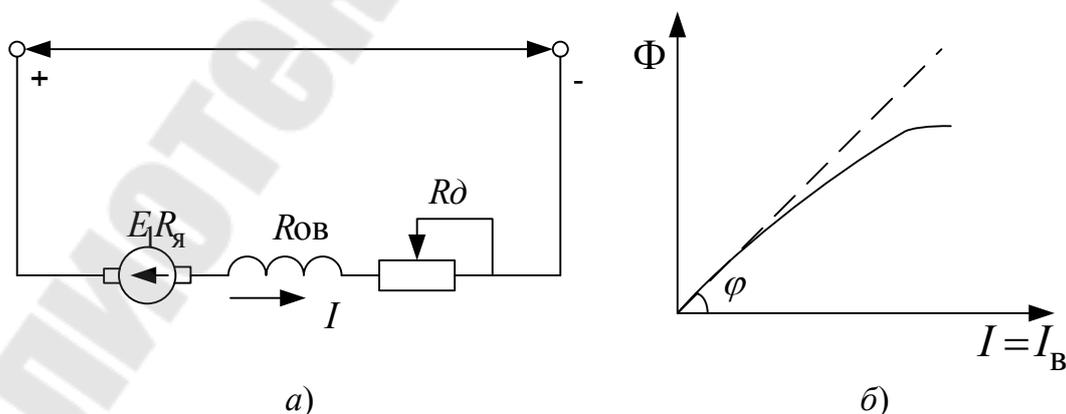


Рис. 4. Схема включения и кривая намагничивания ДПТ последовательного возбуждения

Для получения выражения статических характеристик ДПТ ПВ используются те же допущения, что и для ДПТ НВ.

Для механических и электрических характеристик можно записать:

$$\omega = \frac{u - IR}{k \cdot \Phi(I)}; \quad (1)$$

$$\omega = \frac{u}{k \cdot \Phi(I)} - \frac{MR}{(k \cdot \Phi(I))^2}, \quad (2)$$

где $R = R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{д}}$.

Магнитный поток и ток якоря связаны между собой кривой намагничивания, которая приведена на рис. 4, б. В общем случае эта кривая не имеет точного аналитического выражения, поэтому нельзя получить и точек уровней для характеристик ДПТ НВ.

В простейшем случае можно принять что между током и потоком в машине последовательного возбуждения существует линейная зависимость, что справедливо для ненасыщенной части характеристики намагничивания. Тогда зависимость потока от тока можно выразить следующим способом:

$$\Phi = \alpha I, \quad (3)$$

где $\alpha = \text{tg}\varphi$.

В этом случае момент будет представлять квадратную зависимость от тока:

$$M = k\Phi I = k\alpha I^2. \quad (4)$$

Формулы (1), (2) примут вид:

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}; \quad (5)$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}. \quad (6)$$

Проанализируем уравнения (5) и (6).

1. При $I \rightarrow 0$, $M \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$, т. е. ось скорости является вертикальной асимптотой для характеристики ДПТ ПВ.

2. При $I \rightarrow \infty$, $M \rightarrow \infty$, $\omega = -R/k\alpha$, т. е. прямая с ординатой $\omega_0 = -R/k\alpha$ является горизонтальной асимптотой.

3. Зависимости $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ имеют гиперболический характер.

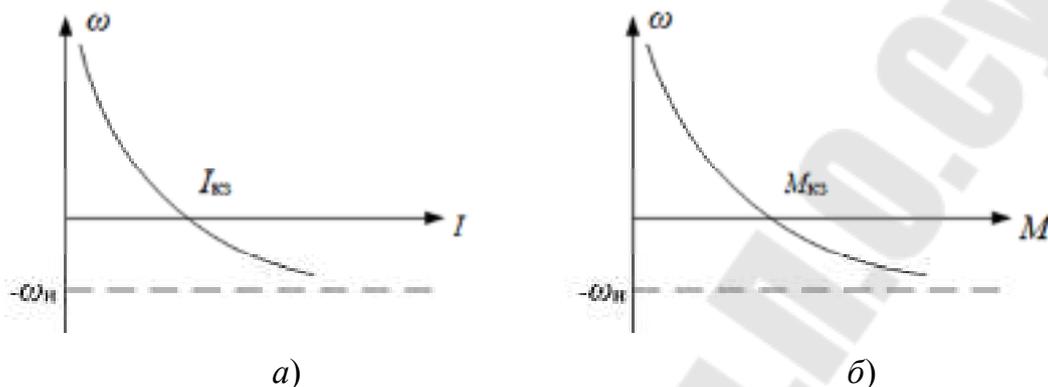


Рис. 5. Электромагнитная и механическая характеристики ДПТ ПВ

Рассмотрим с помощью характеристик, приведенных на рис. 5, энергетические режимы работы ДПТ ПВ.

Особенностью ДПТ ПВ является отсутствие у него режима рекуперативного торможения, так как характеристика ДПТ ПВ не пересекает ось скорости и не переходит во второй квадрант.

Остальные режимы работы ДПТ ПВ аналогичны режимам ДПТ НВ, а именно: двигательный режим имеет место при $0 < \omega < \infty$, режим короткого замыкания при $\omega = 0$, режим торможения противовключения, имеющий место в четвертом квадранте при $\omega < 0$, кроме того существует также режим динамического торможения.

Выражения (5) и (6) должны иметь общее представление о характеристиках ДПТ ПВ и не могут быть использованы для инженерных расчетов. Причина этого заключается в принятой линейной аппроксимации кривой намагничивания, в то время как выпускаемые промышленностью ДПТ ПВ работают на криволинейной части характеристики намагничивания, или даже в области насыщения магнитной системы, что определяется стремлением наиболее полного использования ее активных материалов. Двигатели, работающие в ненасыщенной части характеристики намагничивания, имеют повышенные габариты.

Магнитный поток двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при изменении нагрузки на валу изменяется непропорционально току якоря, и фактически естественная характеристика значительно отличается от гиперболы.

Для построения искусственных характеристик двигателя ПВ пользуются его естественной характеристикой, которая дается заводом-изготовителем на основании опытных данных для серии выпускаемых двигателей и носит название **универсальной характеристики** (рис. 6). Естественная характеристика ДПТ ПВ – это характеристика $\omega = f(I)$ и $M = f_1(I)$, которые получены на основании выбора средних значений относительных величин скорости тока и момента из результатов испытаний ряда машин одной серии. За 100 % на приведенных графиках взяты номинальные величины момента на валу двигателя, скорости и тока.

При введении в цепь якоря двигателя дополнительного сопротивления можно получить характеристики, которые называются искусственными или реостатными. Отношение скорости на естественной и искусственной характеристиках при одном и том же токе якорной цепи, а, следовательно, и при одном и том же потоке возбуждения, равно отношению ЭДС якоря, соответствующих этим скоростям:

$$\frac{\omega_{ti}}{\omega_{ui}} = \frac{E_e}{E_n}, \quad (7)$$

где ω_{ti} , E_e – скорость и ЭДС двигателя при работе на естественной характеристике; ω_{ui} , E_n – скорость и ЭДС при работе на искусственной характеристике.

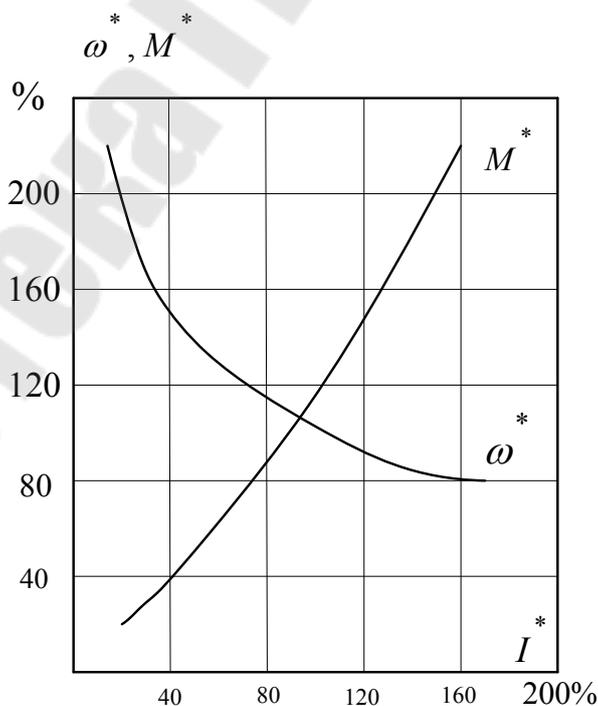


Рис. 6. Универсальные характеристики ДПТ ПВ

Универсальные характеристики представляют собой зависимость относительных значений скорости ДПТ $\omega_* = \omega / \omega_{\text{НОМ}}$ от относительного тока $I_* = I / I_{\text{НОМ}}$.

Выразив ЭДС через напряжение сети и падение напряжения в якровой цепи, получим выражение для расчета реостатных характеристик двигателя:

$$\omega_{ni} = \omega_{ei} \frac{U_n - I_i(R_{\text{я}} + R_{\text{ОВ}} + R_{\text{д}})}{U - I_i(R_{\text{я}} + R_{\text{ОВ}})}. \quad (8)$$

Порядок построения реостатных характеристик следующий:

1. Задаемся рядом значений тока ДПТ I_1, I_2 (рис. 7).

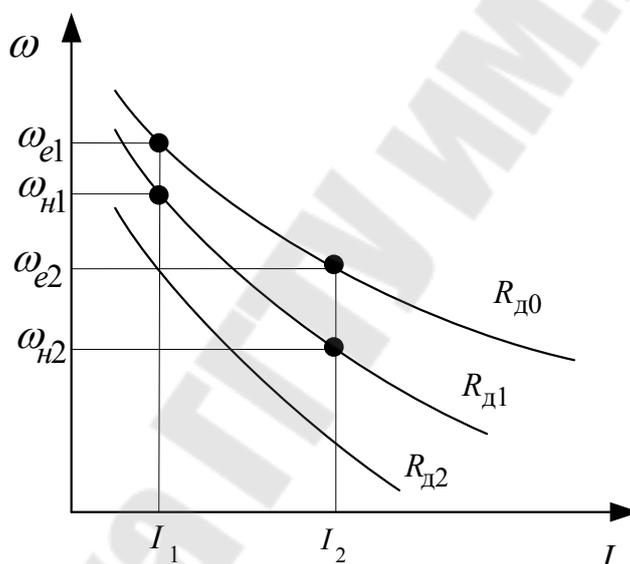


Рис. 7. Искусственные реостатные электромеханические характеристики

2. По имеющейся естественной характеристике для этих значений тока определяем скорость ω_{e1}, ω_{e2} .

3. По формуле (8) для данного $R_{\text{д}}$ рассчитываются скорости $\omega_{н1}, \omega_{н2}$ и строится электромеханическая реостатная характеристика.

4. Для построения реостатной механической характеристики используются универсальные характеристики (см. рис. 6), с помощью которых для токов $I_1, I_2 \dots$ определяются моменты M_1, M_2 . Далее на плоскости (ω, M) наносятся точки с координатами $(\omega_{н1}, M_1), (\omega_{н2}, M_2)$. И по ним строится характеристика.

Отметим, что необходимые для расчета значения $R_{я}$ и $R_{ОВ}$ могут быть найдены по справочным данным, экспериментально, или по следующим приближенным формулам:

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta) \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}};$$

$$R_{ОВ} = 0,5R_{я}.$$

Актуальную задачу представляет расчет сопротивления пускового реостата. Наиболее распространенным способом является графоаналитический метод, который основан на том, что для двигателя последовательного возбуждения существует линейная зависимость между сопротивлением якорной цепи и скоростью при построении тока якоря. При расчете пускового реостата двигателя последовательного возбуждения, задавшись пределами изменения пускового тока, можно найти сопротивления якорной цепи при неподвижном двигателе.

$$R_1 = \frac{U_{н}}{I_1}; \quad R_2 = \frac{U_{н}}{I_2}.$$

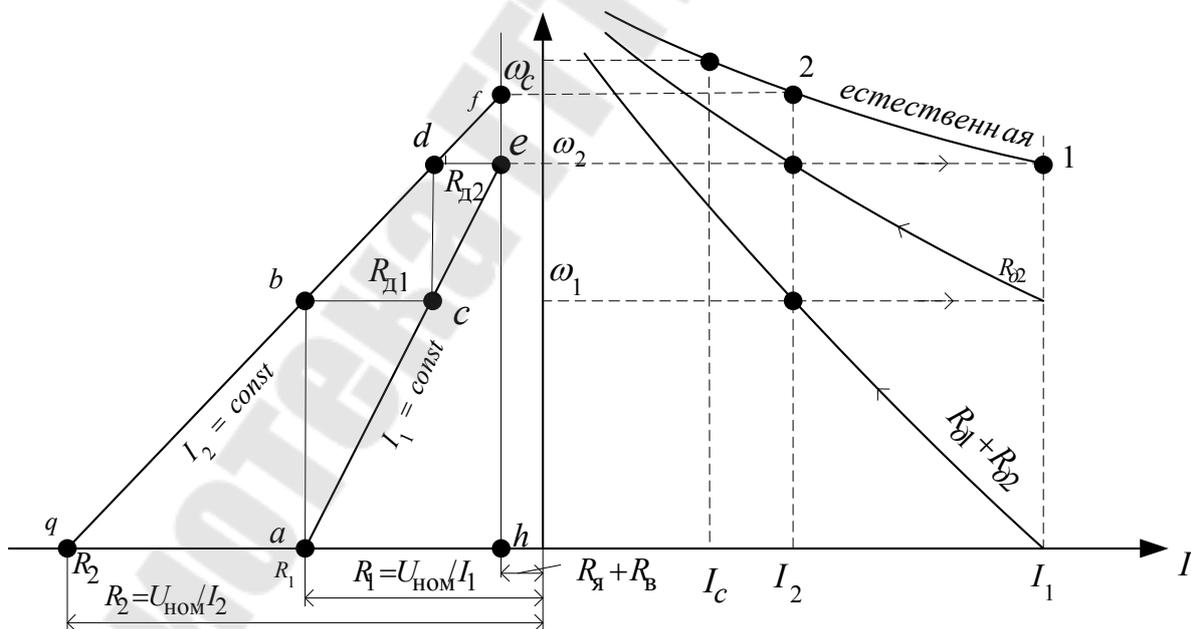


Рис. 8. Графический метод расчета пускового реостата ДПТ ПВ

1. В правой части рис. 8 при построении откладываются пределы изменения тока и наносится естественная характеристика двигателя, построенная по универсальной характеристике, взятой из катало-

га. Проводим вертикальные линии, соответствующие пределам изменения тока до пересечения с естественной характеристикой.

2. По формулам (9), (10) определяем $R_{я} + R_{ОВ} = 0,75(1 - \eta) \frac{U_H}{I_H}$

и во втором квадранте откладываем отрезок $oh = R_{я} + R_{ОВ}$ и проводим вертикальную линию fh . Через точки 1 и 2 естественной характеристики проводим горизонтальные прямые до пересечения с линией fh в точках e и f .

3. Откладываем от начала координат отрезки $oa = R_1$ и $oq = R_2$. Соединяем точки ea и fq , получаем две прямые которые отражают линейную зависимость между скоростью ДПТ и сопротивлением якорной цепи при неизменном токе якоря.

4. Через точку a проводим вертикальную линию до пересечения с прямой fq в точке, затем через точку b проводим горизонтальную линию до пересечения с прямой ea в точке c . Аналогично строим отрезки dc и de . Из построения следует, что отрезок bc соответствует первой ступени пускового резистора R_{g1} , а отрезок de – второй ступени R_{g2} .

Построение диаграммы считается правильным, если отрезок de будет находиться на горизонтальной линии, проходящей через точку 1. Если это не произойдет, то построение следует повторить, изменяя токи I_1 и I_2 .

Таблица 5

Вариант	Тип	Напряжение U , В	Номинальная мощность P , кВт	Максимальная частота вращения n_{max} , об/мин	Номинальная частота вращения $n_{ном}$, об/мин	Ток $I_{я}$, А	Сопротивление якоря $R_{я}$, Ом	Сопротивление ОВ $R_{ОВ}$, Ом
<i>Тихоходное исполнение</i>								
1	Д12	220	2,5	3600	1100	16	1,63	0,59
2	Д21	220	4,5	3600	900	28	0,94	0,28
3	Д21	440	4	4600	1050	13	3,8	1,8
4	Д22	220	6	3600	850	37	0,57	0,26
5	Д31	220	8	3600	800	47	0,42	0,11
6	Д32	220	12	3300	675	69	0,28	0,097
7	Д41	220	16	3000	650	89	0,16	0,049

Окончание табл. 5

Вариант	Тип	Напряжение U , В	Номинальная мощность P , кВт	Максимальная частота вращения n_{\max} , об/мин	Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	Ток $I_{\text{я}}$, А	Сопротивление якоря $R_{\text{я}}$, Ом	Сопротивление ОВ $R_{\text{ОВ}}$, Ом
8	Д41	440	15	3000	660	43	0,7	0,21
9	Д806	220	22	2600	575	120	0,11	0,052
10	Д808	220	37	2300	525	200	0,054	0,031
11	Д808	440	37	2300	525	100	0,21	0,14
12	Д810	220	55	2200	500	204	0,035	0,016
13	Д810	440	55	2200	510	145	0,14	0,06
14	Д812	220	75	1900	475	390	0,023	0,01
15	Д812	440	75	1900	500	180	0,1	0,04
16	Д814	220	110	1700	460	565	0,013	0,007
17	Д814	440	110	1700	460	280	0,052	0,024
18	Д816	220	150	1600	450	765	0,0091	0,005
19	Д816	440	150	1600	460	380	0,035	0,018
20	Д818	220	185	1500	410	935	0,0066	0,003
21	Д818	440	185	1500	410	467	0,026	0,013
<i>Быстроходное исполнение</i>								
22	Д21	220	5,5	3600	1200	33	0,53	0,28
23	Д22	220	8	3600	1200	46	0,32	0,19
24	Д22	440	7	3600	1180	21	1,69	0,96
25	Д31	220	12	3600	1100	68	0,19	0,11
26	Д32	220	18	3300	960	98	0,12	0,05
27	Д32	440	17	3300	970	47	0,53	0,27
28	Д41	220	24	3000	970	130	0,072	0,05
29	Д806	220	32	2600	900	170	0,047	0,03
30	Д806	440	32	2600	900	85	0,2	0,1

ЗАДАЧА 4

Автоматизация пуска, торможения и реверса ДПТ в функции ЭДС

Основные теоретические положения

В релейно-контакторных схемах управления электроприводами постоянного тока в функции скорости используются реле напряжения, катушки которых подключают параллельно якорю двигателя.

По мере разгона ЭДС якоря возрастает в соответствии с выражением $E = c\omega\Phi$, реле напряжения последовательно срабатывают при определенных напряжениях и подают сигналы на включение силовых аппаратов.

Построение пусковых и тормозных характеристик

Исходные данные к задаче представлены в табл. 1.

Для данного двигателя необходимо:

- 1) рассчитать и построить естественную механическую характеристику;
- 2) рассчитать и построить две искусственные характеристики и характеристику торможения противовключением;
- 3) рассчитать пусковые и тормозные сопротивления;
- 4) определить при каком напряжении происходит срабатывание реле KV1, KV2 и KV3.

Пример

ДПТ параллельного возбуждения с параметрами $P_n = 75$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 380$ А, $n_n = 900$ об/мин, используется для автоматизации пуска, реверса и торможения в функции ЭДС (рис. 9).

Решение

1. Построение естественной механической характеристики.

Рассчитаем номинальный КПД двигателя

$$\eta_n = \frac{P_n}{U_n I_n} = \frac{75 \cdot 10^3}{220 \cdot 380} = 0,9.$$

Сопротивление обмотки якоря

$$R_{ян} = \frac{0,5 \cdot U_n (1 - \eta_n)}{I_n} = \frac{0,5 \cdot 220 (1 - 0,9)}{380} = 0,029 \text{ Ом.}$$

Частота вращения идеального холостого хода, считая, что $I_я = I_n$

$$n_0 = n_n \frac{U_n}{U_n - I_n R_{ян}} = 900 \frac{220}{220 - 380 \cdot 0,029} = 950 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_H = \frac{9550 \cdot P_H}{n_0} = \frac{9550 \cdot 75}{900} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

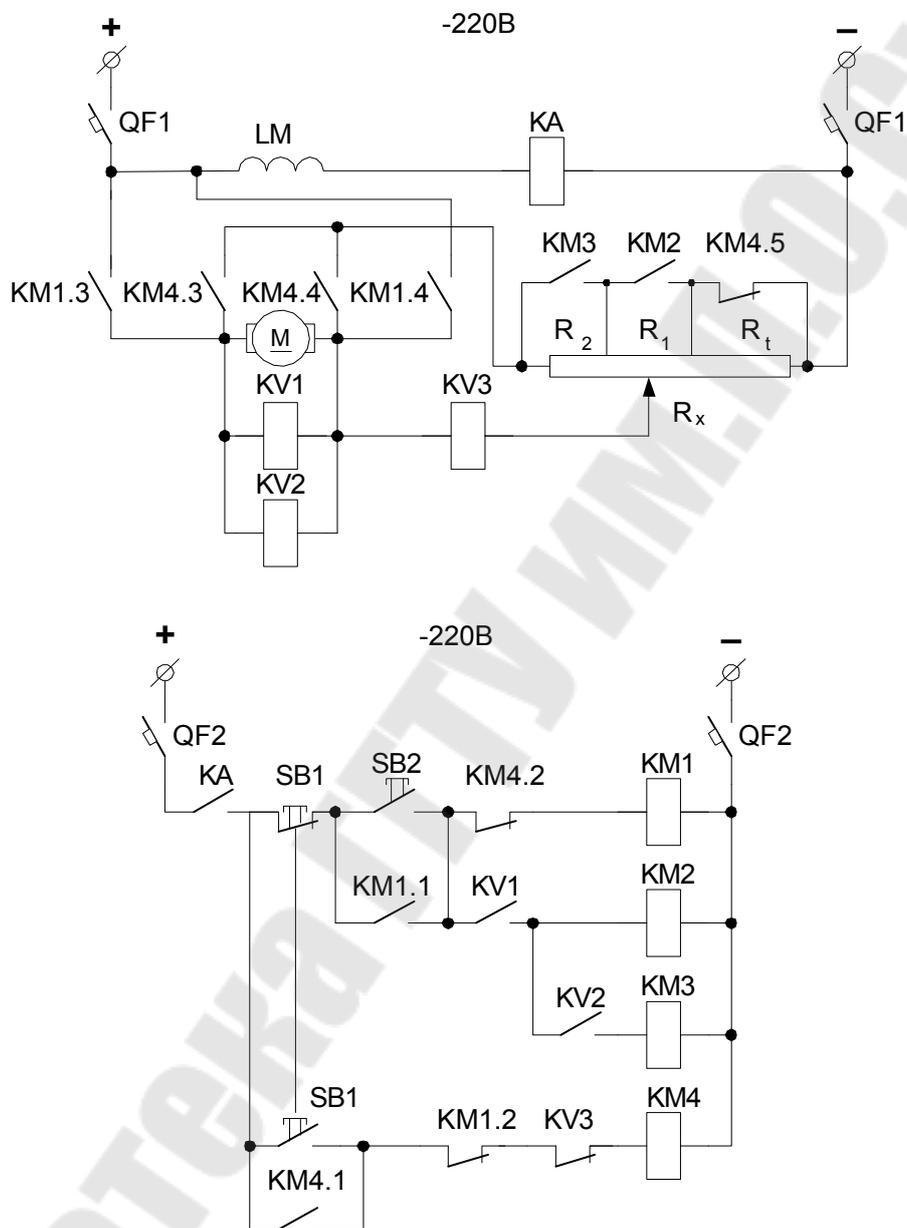


Рис. 9. Исследуемая схема

Естественную характеристику строим по двум точкам (рис. 10):

т. А $n_{(A)} = n_0 = 950$ об/мин, $M_{(A)} = 0$;

т. В $n_{(B)} = n_H = 900$ об/мин, $M_{(B)} = M_H = 800 \text{ Н} \cdot \text{м.}$

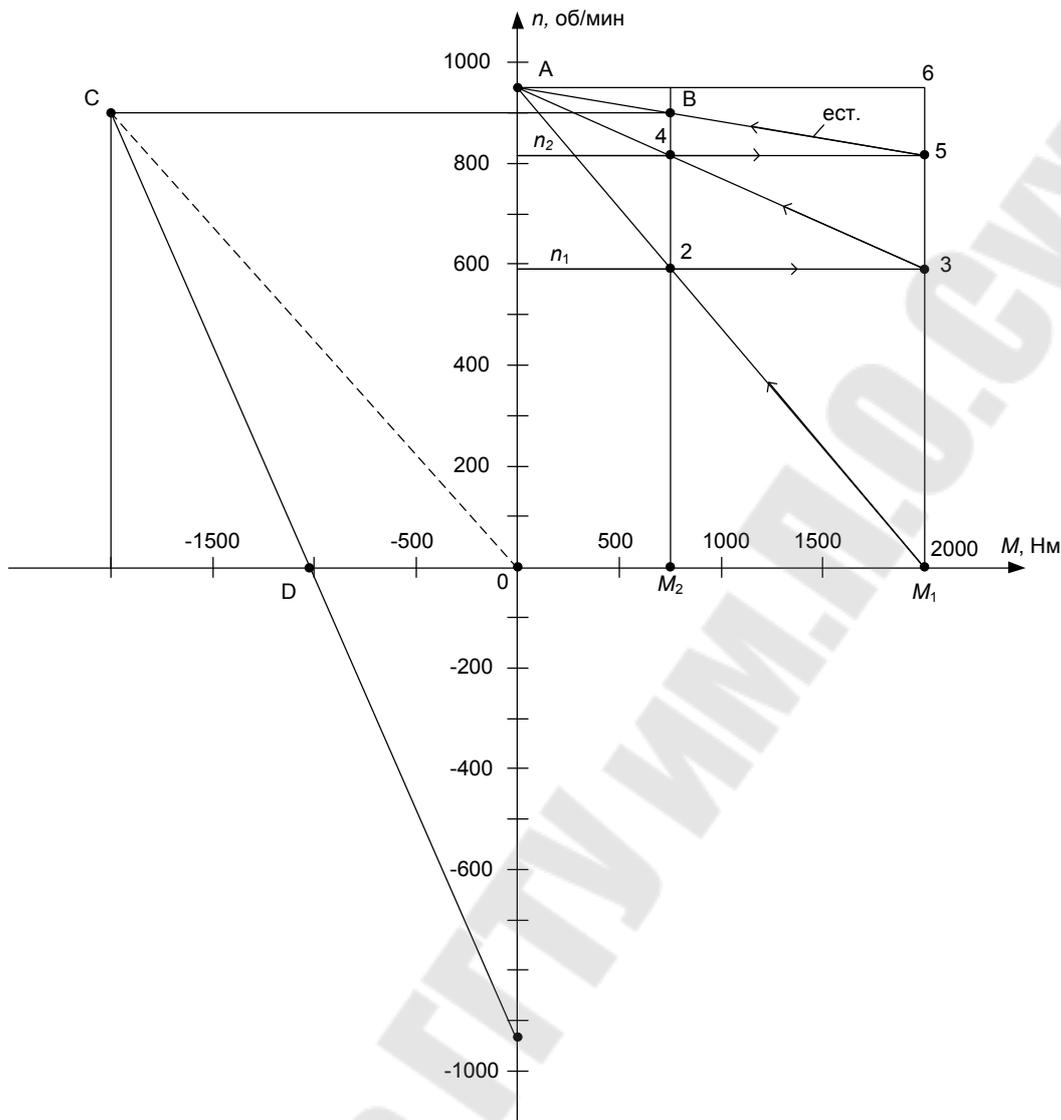


Рис. 10. Пусковая диаграмма

2. Построение искусственных и тормозной характеристик.

Для построения искусственных характеристик задаемся моментами: наибольшим $M_1 = (2 - 2,5)M_n = 2,5M_n = 2,5 \cdot 800 = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $M_2 \geq (1,1 - 1,2)M_c = 0,94 \cdot M_n = 0,94 \cdot 800 = 750 \text{ Н} \cdot \text{м}$, при котором происходит шунтирование пусковых сопротивлений. Момент M_2 подбирается графически, в зависимости от мощности электродвигателя и числа пусковых ступеней. Через точки, соответствующие моментам M_1 и M_2 проводим линии, перпендикулярные оси моментов. Соединяем точки 1 и А. Получаем первую искусственную характеристику, по которой разгоняется двигатель с пусковым сопротивлением $R_1 + R_2$. В точке 2 срабатывает реле КВ1 и закорачивается сопротивление R_1 . Двигатель «переходит» в точку 3 и разгоняется по второй искусст-

венной характеристике. В точке 4 срабатывает реле KV2, закорачивающее пусковое сопротивление R_2 , и двигатель выходит на естественную характеристику в точке 5. Если при построении пусковой диаграммы не попадаем в точку 5, то необходимо изменить значение M_2 независимо от предварительного расчета.

3. Расчет сопротивлений.

Рассчитаем номинальное сопротивление двигателя

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{220}{380} = 0,579 \text{ Ом.}$$

Определим масштаб сопротивлений.

Длина отрезка [1,6] = 9,5 см соответствует $R_H = 0,579$ Ом, тогда

$$m_R = \frac{R_H}{[1,6]} = \frac{0,579}{9,5} = 0,0609 \text{ Ом/см.}$$

Сопротивления пускового реостата (отрезки берутся при номинальном моменте двигателя M_H равны:

$$R_1 = m_R[2', 4'] = 0,0609 \cdot 5,6 = 0,341 \text{ Ом;}$$

$$R_2 = m_R[4', B] = 0,0609 \cdot 2,3 = 0,14 \text{ Ом.}$$

Сопротивление торможения противовключением равно (задаем-ся током $I_{\text{доп}} = 2,5 I_H$):

$$R_{T\Sigma} = \frac{2U_H}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{яH}} = \frac{2U_H}{2,5I_H} - R_{\text{яH}} = \frac{2 \cdot 220}{2,5 \cdot 380} - 0,029 = 0,434 \text{ Ом.}$$

4. Определим напряжения срабатывания реле KV1, KV2 и KV3. При постоянном магнитном потоке ЭДС якоря ДПТ прямо пропорциональна скорости $E = k\Phi\omega$. Поэтому катушку реле напряжения можно включать непосредственно на зажимы якоря. Однако напряжение на зажимах якоря $U_{\text{я}}$ отличается от $E_{\text{я}}$ на величину падения напряжения в обмотке якоря, тогда

$$U_{\text{я}} = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}} = k\Phi\omega + I_{\text{я}}R_{\text{я}}.$$

В соответствии с пусковой диаграммой (см. рис. 10) шунтирование пусковых сопротивлений происходит при моменте двигателя $M_2 = 0,94M_H$. Так как момент M пропорционален току $M = k\Phi I$, то величина тока, при котором происходит шунтирование, равна

$$I_2 = 0,94I_H = 0,94 \cdot 380 = 375 \text{ А.}$$

Определим напряжение срабатывания реле KV1:

$$U_{CP1} = U_{KV1} = k\Phi\omega_1 + I_2R_{яH} = 2,1 \cdot 61,7 + 357 \cdot 0,029 = 140 \text{ В,}$$

где $\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 590}{30} = 61,7 \text{ рад/с}$ – угловая скорость, при которой шунтируется R_1 (см. рис. 7);

$$k\Phi = \frac{M_H}{I_H} = \frac{800}{380} = 2,1 \text{ В} \cdot \text{с}$$
 из формулы $M = k\Phi I$.

Напряжение срабатывания реле KV2 определим аналогично:

$$U_{CP2} = U_{KV2} = k\Phi\omega_2 + I_2R_{яH} = 2,1 \cdot 85,9 + 357 \cdot 0,029 = 191 \text{ В,}$$

где $\omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} = \frac{3,14 \cdot 820}{30} = 85,9 \text{ рад/с}$ – угловая скорость, при которой шунтируется R_2 .

Определим напряжение срабатывания реле KV3, когда двигатель остановится ($\omega = 0$). Напряжение на катушке KV3 может быть определено по формуле

$$U_{KV3} = U_c - (U_c + k\Phi\omega) \frac{R_x}{R_{я\Sigma}},$$

где $U_c = 220 \text{ В}$ – напряжение сети; $k\Phi = 2,1 \text{ В} \cdot \text{с}$ – определено ранее; $\omega = 0$; $R_{я\Sigma} = R_{яH} + R_1 + R_2 + R_T$ – суммарное сопротивление цепи якоря при пуске; R_x – часть пускового сопротивления, которая зависит от точки подключения катушки реле KV3.

Как видно из формулы, напряжение U_{KV3} зависит от величины R_x .

Зададимся отношением $\frac{R_x}{R_{я\Sigma}} = 0,5$, тогда

$$U_{KV3} = 220 - (220 + 2,1 \cdot 0) \cdot 0,5 = 110 \text{ В.}$$

С учетом времени срабатывания аппаратов напряжение срабатывания реле KV3 равно

$$U_{CP1} = 0,8U_{KV3} = 0,8 \cdot 110 = 88 \text{ В.}$$

При таком напряжении скорость двигателя практически равна нулю.

Описание работы релейно-контакторной схемы

Включаем автоматы QF1 и QF2. По обмотке возбуждения LM начинает протекать ток и срабатывает токовое реле КА. Его контакт КА в цепи управления замыкается.

Пуск. При нажатии кнопки SB2 напряжение подается на катушку KM1 по цепи: QF2 – КА – SB1 – SB2 – KM4.2 – катушка KM1 – QF2. Контактор KM1 срабатывает, при этом:

- замыкается KM1.1 (шунтируется кнопка SB2);
- размыкается KM1.2 (предотвращает одновременное срабатывание контакторов KM1 и KM4);
- замыкаются силовые контакты KM1.3, KM1.4 (напряжение подается на якорь электродвигателя).

Двигатель начинает разгоняться по первой искусственной характеристике с номинальным магнитным потоком и пусковым сопротивлением в цепи якоря ($R_1 + R_2$). При достижении некоторой скорости (по пусковой диаграмме) ЭДС якоря увеличится настолько, что сработает реле напряжения KV1. Контакт KV1 в цепи управления замыкается и напряжение подается на катушку контактора KM2. Замыкается контакт KM2 и шунтирует первую ступень пускового реостата R_1 . Двигатель продолжает разгоняться по второй искусственной характеристике. При достижении некоторой скорости срабатывает реле напряжения KV2. Контакт KV2 в цепи управления замыкается, напряжение подается на катушку KM3 и шунтирует вторую ступень пускового реостата R_2 . Все сопротивления в цепи якоря закорочены и двигатель разгоняется по естественной характеристике.

Торможение. Нажимаем кнопку SB1 при работающем двигателе. Обесточивается катушка контактора KM1 и все его контакты переключаются. Якорь двигателя отключается от сети. Подается напряжение на катушку контактора KM4 и его якорь притягивается, при этом:

- замыкается контакт KM4.1 (шунтируется кнопка SB1);
- размыкается контакт KM4.2 (предотвращает одновременное срабатывание контакторов KM1 и KM4);
- размыкается контакт KM4.5 (в цепь якоря включается тормозное сопротивление R_T);
- замыкаются силовые контакты KM4.3, KM4.4 (на якорь двигателя подается напряжение другой полярности).

Начинается процесс торможения противовключением с полным сопротивлением ($R_1 + R_2 + R_T$) в цепи якоря (т. С на рис. 8, если двига-

тель работал в номинальном режиме). По мере снижения скорости ЭДС якоря уменьшается и растет напряжение на катушке реле напряжения KV3. При уменьшении скорости двигателя до нуля срабатывает реле KV3. Размыкается его контакт KV3, катушка контактора KM4 отключается и якорь двигателя отключается от сети (т. D).

Защита силовой цепи от КЗ и перегрузок осуществляется автоматом QF1. Защиту от обрыва цепи возбуждения выполняет токовое реле КА. От КЗ цепь управления защищает автомат QF2.

Литература

1. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2000. – 542 с.
2. Электротехника / Б. А. Волынский [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 528 с.
3. Донилов, И. А. Общая электротехника с основами электроники / И. А. Донилов, П. М. Иванов. – М. : Высш. шк., 1998. – 752 с.
4. Рекус, Г. Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники / Г. Г. Рекус, А. И. Белоусов. – М. : Высш. шк., 2001. – 416 с.
5. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – М. : Мастерство, 2000. – 366 с.

Приложение

Технические данные асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А

P_n , кВт	n , об/мин	η , %	$\cos\phi$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	J , кг · м ²
3000 об/мин (синхронная скорость)							
22,0	2915	88,0	0,88	2,2	1,3	7,0	$4,25 \cdot 10^{-2}$
30,0	2915	90,0	0,91	2,2	1,3	7,0	$5,5 \cdot 10^{-2}$
37,0	2945	91,0	0,91	2,2	1,2	7,0	$8,0 \cdot 10^{-2}$
45,0	2945	91,0	0,91	2,2	1,3	7,0	$9,25 \cdot 10^{-2}$
55,0	2940	91,0	0,90	2,5	1,3	7,0	$16,0 \cdot 10^{-2}$
75,0	2940	92,0	0,90	2,5	1,3	7,0	$19,0 \cdot 10^{-2}$
90,0	2945	92,0	0,88	2,2	1,2	7,0	$23,8 \cdot 10^{-2}$
110,0	2950	93,0	0,86	2,2	1,2	7,0	$44,3 \cdot 10^{-2}$
132,0	2945	93,0	0,88	2,2	1,2	7,0	$49,5 \cdot 10^{-2}$
160,0	2960	94,0	0,90	2,2	1,2	6,5	$77,5 \cdot 10^{-2}$
200,0	2960	94,5	0,90	2,2	1,2	6,5	1,03
250,0	2970	94,5	0,91	2,1	1,0	6,0	1,7
315,0	2970	94,5	0,92	2,1	1,0	7,0	2,38
400,0	2970	95,0	0,92	2,1	1,0	7,0	2,85
1500 об/мин (синхронная скорость)							
18,5	1450	88,5	0,87	2,1	1,3	6,5	$9,25 \cdot 10^{-2}$
22,0	1450	90,0	0,88	2,1	1,3	6,5	$11,8 \cdot 10^{-2}$
30,0	1465	90,0	0,84	2,2	1,2	6,5	$17,8 \cdot 10^{-2}$
37,0	1470	90,5	0,89	2,2	1,2	6,5	$21,8 \cdot 10^{-2}$
45,0	1475	91,0	0,89	2,5	1,3	6,5	$34,5 \cdot 10^{-2}$
55,0	1475	92,0	0,89	2,5	1,3	6,5	$42,3 \cdot 10^{-2}$
75,0	1475	92,5	0,89	2,2	1,2	6,5	$61,8 \cdot 10^{-2}$
90,0	1480	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5	$88,3 \cdot 10^{-2}$
110,0	1475	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5	$95,8 \cdot 10^{-2}$
132,0	1470	93,0	0,89	2,0	1,2	6,0	1,83
160,0	1470	93,5	0,90	2,0	1,2	6,0	2,13
200,0	1475	94,0	0,91	2,0	1,2	6,0	3,15
250,0	1475	94,0	0,91	2,0	1,2	6,0	3,7
315,0	1485	94,0	0,91	2,0	1,0	7,0	5,75
400,0	1485	94,5	0,91	2,0	1,0	7,0	7,0

P_n , кВт	n , об/мин	η , %	$\cos\varphi$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	J , кг · м ²
1000 об/мин (синхронная скорость)							
18,5	975	87,0	0,85	2,0	1,2	6,0	$18,8 \cdot 10^{-2}$
22,0	975	88,5	0,87	2,0	1,2	6,0	$23,5 \cdot 10^{-2}$
30,0	975	90,0	0,88	2,1	1,3	6,0	$37,8 \cdot 10^{-2}$
37,0	980	90,5	0,88	2,1	1,3	6,5	$43,0 \cdot 10^{-2}$
45,0	980	91,0	0,87	2,0	1,2	6,5	$70,3 \cdot 10^{-2}$
55,0	985	92,0	0,87	2,0	1,2	6,5	1,09
75,0	985	93,0	0,87	2,0	1,2	7,0	1,4
90,0	980	92,5	0,89	2,0	1,2	6,0	2,5
110,0	980	92,5	0,89	2,0	1,2	6,0	2,88
132,0	985	93,0	0,89	2,0	1,2	6,0	4,45
160,0	985	93,5	0,89	2,0	1,2	6,0	5,13
200,0	985	94,0	0,90	2,0	1,2	6,0	7,8
250,0	985	94,0	0,90	2,0	1,2	6,0	9,5
750 об/мин (синхронная скорость)							
15,0	730	86,0	0,80	1,9	1,2	5,5	$23,5 \cdot 10^{-2}$
18,5	730	87,5	0,80	1,9	1,2	5,5	$29,8 \cdot 10^{-2}$
22,0	730	89,0	0,84	2,0	1,3	5,5	$49,0 \cdot 10^{-2}$
30,0	730	89,5	0,82	2,0	1,3	5,5	$58,3 \cdot 10^{-2}$
37,0	735	90,0	0,81	1,9	1,2	5,5	$82,5 \cdot 10^{-2}$
45,0	740	91,0	0,81	1,9	1,2	5,5	1,19
55,0	735	92,0	0,81	1,9	1,2	6,0	1,4
75,0	735	92,0	0,85	1,9	1,2	5,5	3,0
90,0	735	92,5	0,86	1,9	1,2	5,5	3,38
110,0	735	93,0	0,86	1,9	1,2	5,5	6,08
132,0	735	93,0	0,86	1,9	1,2	5,0	7,0
160,0	740	93,5	0,86	1,9	1,2	5,5	9,75
200,0	740	94,0	0,86	1,9	1,2	5,5	11,9
600 об/мин (синхронная скорость)							
45,0	585	90,0	0,81	1,8	1,0	5,5	3,23
55,0	585	90,5	0,81	1,8	1,0	5,5	3,75
75,0	590	91,0	0,82	1,8	1,0	5,5	5,63
90,0	59,0	91,5	0,82	1,8	1,0	5,5	6,63
110,0	590	92,0	0,83	1,8	1,0	5,5	9,68
132,0	590	92,5	0,83	1,8	1,0	5,5	11,0
500 об/мин (синхронная скорость)							
55,0	490	90,5	0,78	1,8	1,0	5,5	5,63
75,0	490	91,0	0,78	1,8	1,0	5,5	6,63
90,0	490	91,5	0,77	1,8	1,0	5,5	9,68
110,0	490	92,0	0,77	1,8	1,0	5,5	11,0

Содержание

Задача 1	3
Задача 2	13
Задача 3	20
Задача 4	27
Литература	35
Приложение	36

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Логвин Владимир Васильевич
Брель Виктор Валерьевич
Дорощенко Игорь Васильевич**

ЭЛЕКТРОПРИВОД РАБОЧИХ МАШИН

Практикум

**по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»
специализаций 1-43 01 03 01 «Электроснабжение
промышленных предприятий» и 1-43 01 03 05
«Электроснабжение предприятий агропромышленного
комплекса» дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 12.11.15.

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

Ризография. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,97.

Изд. № 142.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48