

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ»

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Задание и методические указания по выполнению организуемой
самостоятельной работы студента (ОргСРС) по дисциплине
«Автоматизированный электропривод»*



Волгоград 2015

ВВЕДЕНИЕ

Организуемая самостоятельная работа студента (ОргСРС) по дисциплине «Автоматизированный электропривод» включает комплексное задание по исследованию автоматизированного электропривода и предусматривается построение тахограмм, нагрузочных диаграмм двигателя и рабочей машины, расчет требуемой мощности и выбор электродвигателя (постоянного или переменного тока), расчет и построение механических характеристик, пусковой диаграммы, расчет тормозных режимов работы объекта и разработку электрических принципиальных схем.

Целью выполнения ОргСРС является углубление и закрепление теоретических знаний по изучаемой дисциплине. Основное внимание уделяется выбору электродвигателя, соответствующего заданному режиму рабочей машины, построению его механических характеристик, расчету элементов силовой схемы и разработке схемы управления в релейно-контактном варианте.

2. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ ОРГСРС

ОргСРС состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 15-25 страниц и графической части, включающей принципиальную электрическую схему силовой части привода и электрическую принципиальную схему управления пуском, торможением и реверсированием привода в релейно-контактном варианте.

Пояснительная записка должна включать:

2.1. Титульный лист. Пример оформления титульного листа представлен в Приложении 1.

2.2. Лист задания. Пример оформления листа задания представлен в Приложении 2.

2.3. Анализ исходных данных согласно варианту.

2.4. Расчеты, построения и описания согласно заданию.

2.5. Выводы по работе и список использованной литературы.

3. ЗАДАНИЕ НА ОРГСРС

Исходными данными являются тахограмма $\omega = f(t)$ и механическая характеристика рабочей машины $M_{\text{см}} = f(\omega)$, приведенные в таблицах 1 и 2 соответственно.

Вариант тахограммы (таблица 1) определяется по **последней**, а вариант механической характеристики рабочей машины (таблица 2) – по **предпоследней** цифрам зачетной книжки (студенческого билета).

Содержание задания:

- 3.1. Построить тахограмму рабочей машины $\omega = f(t)$.
- 3.2. Рассчитать и построить механическую характеристику рабочей машины $M_{см} = f(\omega)$.
- 3.3. Построить нагрузочную диаграмму рабочей машины $M_{см} = f(t)$.
- 3.4. Обосновать и выбрать род тока двигателя и номинальный режим работы двигателя.
- 3.5. Выбрать основную скорость вращения рабочей машины.
- 3.6. Рассчитать требуемую номинальную мощность двигателя.
- 3.7. Выбрать двигатель и выписать из справочника его паспортные данные.
- 3.8. Рассчитать передаточное число редуктора рабочей машины.
- 3.9. Построить тахограмму работы двигателя $\omega = f(t)$.
- 3.10. Рассчитать и построить механическую характеристику рабочей машины, приведенную к валу двигателя.
- 3.11. Рассчитать и построить нагрузочную диаграмму двигателя без учета динамических моментов.

Таблица 1

Номер варианта	Частота вращения, рад/с			Продолжительность работы и паузы*, с			
	ω_1	ω_2	ω_3	t_1	t_2	t_3	t_n
0	30	-10	-50	170	130	50	50
1	16	-16	15	20	15	10	20
2	30	10	15	40	30	5	25
3	20	-40	-5	15	15	15	15
4	25	10	20	40	8	4	20
5	15	50	-25	15	30	20	25
6	20	-40	40	30	30	100	10
7	50	10	-20	120	90	100	300
8	40	-20	60	50	50	150	10
9	50	5	-60	220	80	120	200

*В таблице 1 указано время работы с установившейся частотой вращения без учета времени переходного процесса при пуске, торможении и реверсировании, t_n – время паузы.

Таблица 2

Номер варианта	Закон изменения момента статического сопротивления рабочей машины $M_{см}, Нм$	КПД передачи
0	$M_{см} = 200 + 10\omega$	0,9
1	$M_{см} = 50\omega$	0,8
2	$M_{см} = 70 + 4\omega^2$	0,85
3	$M_{см} = 150 - 4\omega$	0,9
4	$M_{см} = 30\omega$	0,8
5	$M_{см} = 1000$	0,85
6	$M_{см} = 500 + 8\omega$	0,9
7	$M_{см} = 100 + 3\omega^2$	0,8
8	$M_{см} = 250 - 6\omega$	0,85
9	$M_{см} = 700$	0,9

3.12. Рассчитать естественную механическую характеристику двигателя и построить ее в 4-х квадрантах.

3.13. Рассчитать пусковые сопротивления и построить пусковую диаграмму при пуске двигателя до скорости ω_1 .

3.14. При $\omega_2 > \omega_1$ или $\omega_2 < \omega_1$ рассчитать регулировочные сопротивления и построить диаграмму перехода на установившуюся скорость ω_2 .

При $\omega_2 < 0$ принять режим торможения противовключением, рассчитать тормозные сопротивления и построить тормозную диаграмму.

3.15. Для останова привода (переход от ω_3 к нулю) принять режим динамического торможения с одной ступенью, рассчитать сопротивление динамического торможения для двигателя постоянного тока или напряжение питания обмотки статора для асинхронного двигателя.

3.16. Разработать электрическую принципиальную схему силовой части привода. Предусмотреть защиту двигателя от перегрузки и короткого замыкания.

3.17. Обосновать и выбрать принципы автоматического управления при пуске, торможении и реверсировании. Принять, что тахограмма выполняется по времени или по командам конечных (путевых) выключателей $SQ_1 - SQ_4$.

3.18. Разработать электрическую принципиальную схему управления пуском, торможением и реверсированием электропривода в релейно-контактном варианте.

4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Пояснительная записка к ОргСРС оформляется на стандартных листах формата А4, заполненных с одной стороны, левое поле не менее 2,5 см, шрифт Times New Roman или аналогичный, размер (кегель) 12 или 14, междустрочный интервал 1,5. Титульный лист и лист задания оформляются в соответствии с Приложением 1 и Приложением 2. На титульном листе студенту необходимо вписать вариант задания (2 последние цифры зачетной книжки), свои ФИО и группу. В листе задания необходимо написать направление подготовки (220400 «Управление в технических системах» или 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств»), свои ФИО, группу, вариант задания, основное содержание расчетно-пояснительной записки и графической части, поставить подпись.

Текст пояснительной записки должен быть написан четко, грамотным инженерным языком, иметь логическую последовательность изложения. Расчеты должны сопровождаться пояснениями и ссылками на литературу, которые приводятся в квадратных скобках, например [1], [2, табл.10], [3, стр.15]. При расчетах формулы сначала записываются или выводятся в буквенном выражении, потом в цифровом, после пишется ответ с указанием единиц измерения. Многократно повторяющиеся расчеты приводятся только один раз, а результаты сводятся в таблицу.

Рисунки и схемы должны быть выполнены в соответствии с правилами ЕСКД, иметь поясняющие подписи под рисунком. Координатные оси графиков должны иметь соответствующие обозначения с размерностями.

В конце пояснительной записки в качестве заключения делаются выводы по работе, в которых указываются полученные результаты и их оценка автором. После приводится список использованной литературы, который оформляется в соответствии с ГОСТ [3].

5. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

5.1. Режимы работы двигателя и рабочей машины в целом часто определяются тахограммой его работы, то есть зависимостью угловой скорости вращения механизма от времени $\omega = f(t)$.

Для построения тахограммы по оси абсцисс откладывается время, по оси ординат угловая частота вращения рабочей машины.

5.2. При расчете и построении механической характеристики рабочей машины $M_{cm} = f(\omega)$ необходимо учесть, что в таблице 2 закон

изменения $M_{см}$ дан для первого квадранта. Для построения механической характеристики рабочей машины в других квадрантах необходимо принять нагрузку реактивной.

5.3. Все рабочие машины могут быть разделены на несколько групп. Одна из групп – это рабочие машины, момент статического сопротивления которых является функцией времени, то есть $M_c = f(t)$ в силу свойств обрабатываемого материала или характера технологического процесса. Эту функцию называют *нагрузочной диаграммой рабочей машины*. Она может быть случайной и детерминированной. При построении нагрузочной диаграммы рабочей машины необходимо рассчитать M_c для заданных интервалов времени. Во время пауз момент статического сопротивления принять равным нулю.

5.4. Выбор двигателя по роду тока рекомендуется выполнить с учетом предполагаемого применения реостатной релейно-контактной системы управления. В таком случае при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать асинхронным двигателям с фазным ротором, которые имеют по сравнению с двигателями постоянного тока меньшую массу, габариты и стоимость, и большую надежность. Кроме того, питание асинхронных двигателей промышленной частоты осуществляется в этих схемах от сети без дополнительных силовых преобразователей, когда увеличение скорости вращения двигателя выше синхронной в двигательном режиме невозможно.

Это означает, что при работе двигателя на естественной механической характеристике должна быть получена максимальная скорость рабочей машины. Понижение скорости обеспечивается введением дополнительного сопротивления в цепь ротора, в результате чего увеличиваются потери и снижаются экономические показатели привода.

При применении двигателей постоянного тока в качестве основной скорости может быть выбрано одно из промежуточных значений тахограммы рабочей машины при условии, что все требуемые повышенные скорости могут быть получены при допустимом ослаблении магнитного потока, а ток якоря не превысит номинальный. Последнее условие выполняется в том случае, когда момент сопротивления рабочей машины снижается с ростом скорости.

Двигателю постоянного тока также следует отдавать предпочтение при больших значениях расчетной (см. п. 5.6.) требуемой номинальной мощности (более 100 кВт.)

Выбор номинального режима работы двигателя из восьми регламентированных ГОСТом режимов ($S_1 - S_8$) рекомендуется ограничить

следующими: S_1 – продолжительный, S_2 – кратковременный и S_3 – повторно-кратковременный. Отечественная промышленность выпускает в основном двигатели с номинальными режимами S_1 и S_3 , и малыми сериями – с режимом S_2 .

Выбор номинального режима работы двигателя обусловлен следующими обстоятельствами:

- двигатели исполнения S_3 предназначены для работы при длительности цикла $t_{\text{ц}}$ не более 10 минут;
- при $t_{\text{ц}}$ более 10 минут или при продолжительности включения (ПВ) более 60% рекомендуется применение двигателей длительного номинального режима S_1 .

Продолжительность включения (ПВ) определяется по формуле:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла, t_p – время работы.

5.5. За основную скорость рабочей машины следует принимать положительную скорость (двигатель вращается по часовой стрелке), при которой машина работает наиболее продолжительный промежуток времени.

5.6. Требуемая номинальная мощность двигателя продолжительного номинального режима работы определяется по формуле:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i + \sum_{j=1}^k M_j^2 \cdot t_j \cdot \left(\frac{\omega_j}{\omega_{\text{осн}}}\right)^2}{t_{\text{ц}}}} \cdot \omega_{\text{осн}} \cdot K_3, \quad (2)$$

где K_3 – коэффициент запаса, учитывающий потери в редукторе и увеличение потерь в двигателе в переходных режимах, $K_3 = 1,1 - 1,3$;

n – число участков тахограммы рабочей машины, на которых скорость равна или меньше основной;

k – число участков тахограммы, на которых скорость превышает основную;

M , ω – момент и скорость рабочей машины;

$t_{\text{ц}}$ – длительность цикла, включая паузу;

$t_{\text{п}}$ – длительность паузы;

P_3 – эквивалентная мощность двигателя.

Требуемая номинальная мощность двигателя повторно-кратковременного номинального режима работы при действительной

продолжительности включения $P_{\text{э}}$ ($\text{ПВ}_{\text{действ}}$) определяется по формуле (2) при подстановке в знаменателе вместо $t_{\text{ц}}$ значения $(t_{\text{ц}} - t_{\text{п}})$.

Для выбора двигателя по справочнику необходимо полученное значение мощности двигателя с действительной продолжительностью включения ($\text{ПВ}_{\text{действ}}$) привести к ближайшему стандартному ($\text{ПВ}_{\text{ст}}$) по формуле:

$$P_{\text{э}}^{\text{ПВ}_{\text{ст}}} = P_{\text{э}}^{\text{ПВ}_{\text{действ}}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{действ}}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}} \quad (3)$$

Стандартные относительные продолжительности включения составляют 15, 25, 40 и 60%.

5.7. Выбор двигателя производится в соответствии с требуемой мощностью и его рациональным номинальным режимом по любой справочной литературе, например [8, 10]. Основные серии двигателей продолжительного номинального режима:

- постоянного тока – 2П, 4П, П, ПБС;
- асинхронные с фазным ротором – 4АК, 4АНК, АОК 2, АК 2.

Основные серии двигателей повторно-кратковременного номинального режима:

- постоянного тока – Д;
- асинхронные с фазным ротором – МТФ, МТН.

5.8. Передаточное число редуктора рассчитывается по формуле:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n}, \quad (4)$$

где $n_{\text{дв}}$ – номинальная частота вращения двигателя, об/мин,

n – частота вращения рабочей машины, которая определяется по формуле:

$$n = \frac{30 \cdot \omega_0}{\pi}, \quad (5)$$

где ω_0 – основная скорость вращения рабочей машины.

Необходимо принять ближайшее значение из типового ряда передаточных отношений редуктора (из справочника). Например, 2-х ступенчатый цилиндрический редуктор имеет следующие значения передаточных чисел: 8,23; 10,35; 12,64; 15,75; 20,49; 23,34; 31,50; 40,17; 48,57.

5.9. Тахограмма работы двигателя $\omega = f(t)$ строится аналогично п. 5.1 с учетом передаточного числа рассчитанного редуктора.

5.10. Момент рабочей машины, приведенный к валу двигателя, рассчитывается по формуле:

$$M_c = \frac{M_{cm}}{i \cdot \eta}, \quad (6)$$

где η – КПД передачи (из таблицы 2).

Построение механической характеристики рабочей машины, приведенной к валу двигателя, осуществляется аналогично п. 5.2.

5.11. Расчет и построение нагрузочной диаграммы двигателя без учета динамических моментов производится аналогично п. 5.3. согласно значениям M_c , рассчитанным по формуле (6).

5.12. Расчет механических характеристик электродвигателей по паспортным данным осуществляется в зависимости от типа двигателя.

А. Электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением (НВ) имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_y}{(C\Phi)^2} \cdot M, \quad (7)$$

где U – напряжение питания якорной обмотки;

Φ – магнитный поток возбуждения;

R_y – активное сопротивление якорной обмотки;

M – вращающий момент двигателя;

C – конструктивная постоянная двигателя.

В справочниках по электрическим машинам приводится следующий минимум данных электродвигателя: номинальная мощность P_n , кВт; номинальное напряжение U_n , В; номинальная скорость вращения n , об/мин; коэффициент полезного действия двигателя η_n .

Для определения необходимых дополнительных данных следует иметь в виду следующее:

1) В паспортных данных электродвигателей в качестве номинальной мощности P_n приводится значение полезной механической мощности на валу. Коэффициент полезного действия двигателя определяется отношением полезной механической мощности на валу к активной подводимой электрической мощности.

Мощность, потребляемая якорем двигателя из сети, кВт:

$$P_c = U \cdot I_y \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Часть этой мощности расходуется на покрытие мощности потерь в сопротивлении обмотки якоря (P_m) и сопротивлении щеточного контакта ($P_{щ}$):

$$P_m + P_{щ} = I_y^2 \cdot R_y \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

Остальная часть потребляемой из сети мощности преобразуется в электромагнитную мощность двигателя:

$$P_3 = P_c - (P_m + P_{ш}) = (U - I_{я} \cdot R_{я}) \cdot I_{я} \cdot 10^{-3} = E \cdot I_{я} \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Электромагнитную мощность можно также выразить через электромагнитный момент двигателя M_3 и скорость вращения вала:

$$P_3 = M_3 \cdot \omega \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

Отсюда электромагнитный момент двигателя, Нм:

$$M_3 = 1000 \frac{P_3}{\omega}. \quad (12)$$

Полезная механическая мощность P_H , отдаваемая валом двигателя, меньше электромагнитной мощности P_3 на величину мощности механических потерь ($P_{мех}$) и мощности потерь в стали ($P_{ст}$):

$$P_H = P_3 - (P_{мех} + P_{ст}). \quad (13)$$

Исходя из вышеизложенного, номинальный ток якоря двигателя $I_{ян}$, определяется по формуле:

$$I_{ян} = \frac{1000 \cdot P_H}{U_H \cdot \eta_H} \quad (14)$$

2) Активное сопротивление якорной цепи двигателя можно приближенно определить из условия, что при номинальном токе якоря половина всех потерь в двигателе приходится на потери в сопротивлении цепи якоря:

$$I_{ян}^2 \cdot R_{я} = 0.5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot U_H \cdot I_{ян}. \quad (15)$$

Откуда:

$$R_{я} = 0.5 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{U_H}{I_{ян}}. \quad (16)$$

3) Механическая характеристика ДПТ с НВ изображается прямой линией, проходящей последовательно через 2, 1 и 4-й квадранты, лишь тогда, когда она представляет зависимость скорости вращения от электромагнитного момента.

Полезный момент на валу двигателя M в двигательном режиме меньше электромагнитного M_3 на величину момента потерь холостого хода $M_{ХХ}$, т.е. $M = M_3 - M_{ХХ}$ и больше электромагнитного на эту же величину в тормозном режиме, т.е. $M = M_3 + M_{ХХ}$. Поэтому график механической характеристики ДПТ в случае, когда по оси абсцисс откладывается момент на валу, имеет разрыв при $\omega = 0$, равный $2M_{ХХ}$. Обычно $M_{ХХ}$ составляет 3 – 5% от номинального момента двигателя M_H и можно эти потери не учитывать.

Построение естественной механической характеристики ДПТ с НВ в координатах $\omega - M_3$ ведется по двум точкам: $[M = 0, \omega = \omega_0]$ и $[M_3 = M_H, \omega = \omega_H]$, где

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}; M_H = C\Phi I_{ян}. \quad (17)$$

$$C\Phi = \frac{(U_n - R_{я} I_{ян})}{\omega_n}; \quad (18)$$

$$\omega_0 = \frac{U_n}{C\Phi}; \quad (19)$$

На рис.1 приведен примерный вид механических характеристик ДПТ с НВ для вышеуказанных вариантов.

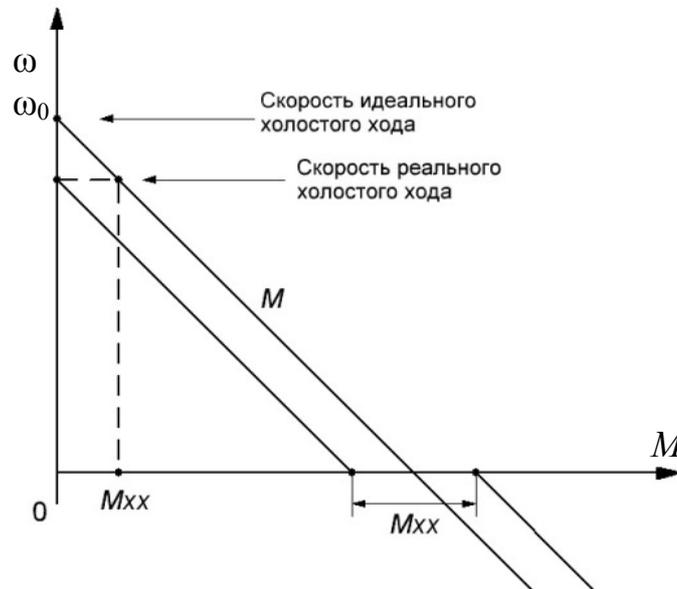


Рис.1. Механические характеристики ДПТ с НВ

Б. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором

Паспортные данные асинхронного электродвигателя (АД): номинальная мощность P_n , кВт; номинальное напряжение U_n , В; номинальная скорость вращения вала n_n , об/мин; коэффициент полезного действия η_n ; коэффициент мощности $\cos\varphi$; перегрузочная способность двигателя по моменту λ .

Построение естественной механической характеристики проводят после определения значений следующих переменных:

1) синхронная скорость, рад/сек:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (20)$$

где f_1 – частота тока статора,

p – число пар полюсов обмотки статора;

2) номинальная скорость:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}; \quad (21)$$

3) номинальный (электромагнитный) момент двигателя, Нм:

$$M_{\text{н}} = \frac{1000P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (22)$$

4) максимальный (критический) момент:

$$M_{\text{к}} = \lambda M_{\text{н}}; \quad (23)$$

$M_{\text{к}}$ можно вычислить по известным параметрам обмоток статора и ротора:

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{к}}^2})}. \quad (24)$$

Здесь и далее индекс 1 означает принадлежность параметра обмотке статора, индекс 2 – обмотке ротора, индекс ' – приведение к статору. Знак плюс соответствует двигательному режиму работы, знак минус – генераторному.

5) номинальное скольжение:

$$S_{\text{н}} = \frac{(\omega_0 - \omega_{\text{н}})}{\omega_0}; \quad (25)$$

6) критическое скольжение:

$$S_{\text{к}} = S_{\text{н}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 1}); \quad (26)$$

$S_{\text{к}}$ можно вычислить по известным параметрам обмоток статора и ротора:

$$S_{\text{к}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{к}}^2}}. \quad (27)$$

Теперь задаваясь значениями скольжения S от 0 до 1, вычисляют момент двигателя по формуле:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{\frac{S}{S_{\text{к}}} + \frac{S_{\text{к}}}{S}} \quad (28)$$

и строят естественную механическую характеристику АД сначала в координатах $M = f(S)$, а затем в координатах $\omega = f(M)$.

5.13. Расчет сопротивлений секций пускового реостата для схемы реостатного пуска ДПТ с НВ начинается с построения механических характеристик, на которых двигатель должен работать в процессе пуска. Удобнее пользоваться характеристиками $\omega = f(I_{\text{я}})$ (рис. 2)

Сначала строится естественная электромеханическая характеристика и на оси абсцисс отмечают значения статического тока $I_{\text{с}}$, наибольшего тока при пуске I_1 (точка *a*) и минимального пускового тока или тока переключения I_2 (точка *b*). Значения этих токов выбираются из условий:

$$I_1 = 2 - 2,5 I_{\text{ян}}; \quad (29)$$

$$I_2 = 1,2 - 1,5 I_{\text{ян}}. \quad (30)$$

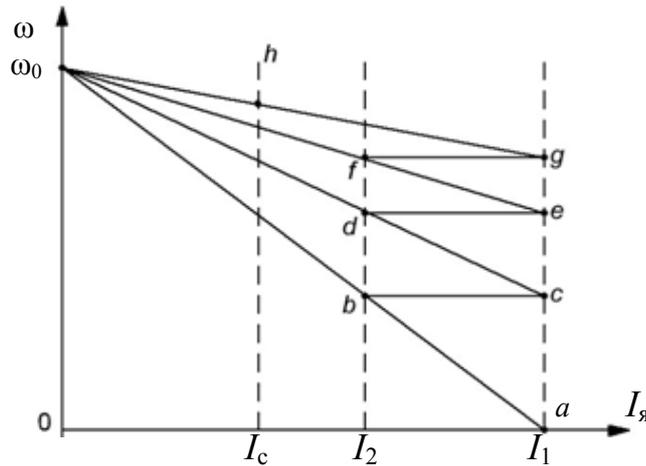


Рис. 2. Пусковая диаграмма ДПТ с НВ

Соединяя точки $a - \omega_0$ прямой, получим искусственную характеристику двигателя при работе с полным пусковым сопротивлением. Ток двигателя при неподвижном якоре будет больше тока I_c , соответствующего статическому моменту, и двигатель начнет ускоряться. По мере разгона двигателя ток якоря уменьшается, одновременно уменьшается ускорение. Для предотвращения этого при значении тока I_2 (точка b) пусковое сопротивление уменьшают так, чтобы ток возрос снова до значения I_1 (точка c) и двигатель перешел на новую искусственную характеристику $\omega_0 - c$. Процесс разгона двигателя продолжится по линии $c - d - e - f$ с выходом на естественную характеристику (точка g) и переходом в рабочую точку h . При правильно подобранных ступенях пускового сопротивления выход на естественную характеристику должен происходить при токе I_1 (точка g). Если это не получается, то нужно сделать новое графическое построение пусковой диаграммы, изменив значение тока I_2 .

Обозначим число искусственных характеристик пусковой диаграммы – m и введем индексы пусковых сопротивлений в соответствии со схемой включения двигателя (рис. 3).

Возьмем любой переход с одной искусственной характеристики на другую, например, из точки b в точку c , обозначив этот переход как переход с пусковой ступени m на пусковую ступень $m - 1$. За время переключения двигатель вращается с некоторой постоянной скоростью и имеет ЭДС вращения E_m . Тогда:

$$I_2 = \frac{(U - E_m)}{R_m}, \quad I_1 = \frac{(U - E_m)}{R_{m-1}} \quad \text{и} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_{m-1}}. \quad (31)$$

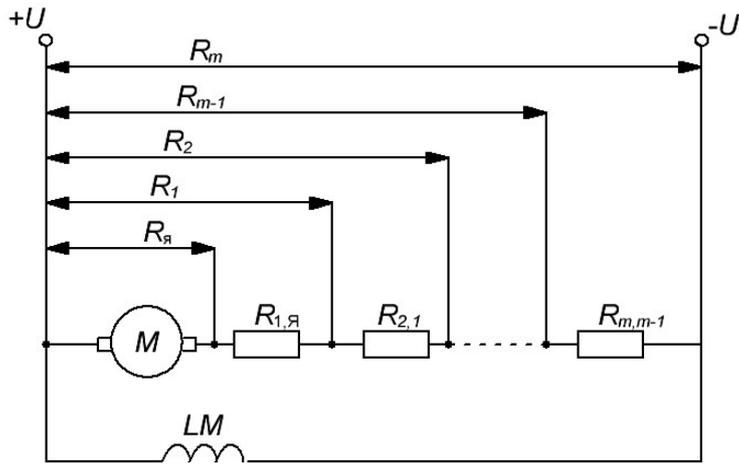


Рис. 3. Схема включения ДПТ с НВ

Аналогичные соотношения токов могут быть получены при правильно рассчитанной диаграмме для всех ступеней, т.е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_{m-1}} = \frac{R_{m-1}}{R_{m-2}} = \dots = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_{я}}. \quad (32)$$

Если обозначить $\frac{I_1}{I_2} = \lambda$ (кратность пусковых токов), то получим:

$$\begin{aligned} R_1 &= \lambda \cdot R_{я}; \\ R_2 &= \lambda \cdot R_1 = \lambda^2 \cdot R_{я}; \\ R_3 &= \lambda \cdot R_2 = \lambda^2 \cdot R_1 = \lambda^3 \cdot R_{я}; \\ &\dots \dots \dots \\ R_m &= \lambda \cdot R_{m-1} = \dots \dots \dots = \lambda^m \cdot R_{я}; \end{aligned} \quad (33)$$

Из последнего уравнения имеем:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_{я}}}, \quad (34)$$

откуда

$$m = \frac{\lg(R_m / R_{я})}{\lg(\lambda)}. \quad (35)$$

Принят следующий порядок расчета пусковых сопротивлений.

1) Так как в точке *a* $E = 0$ и $I_1 = \frac{U}{R_m}$, определяют R_m по формуле:

$$R_m = \frac{U}{I_1}. \quad (36)$$

2) Задаются величиной $\lambda = \frac{I_1}{I_2}$.

3) Определяют число ступеней m по формуле (35). Если m получается дробным, его округляют до целого числа и по формуле (34) уточняют значение λ для его использования в дальнейших расчетах.

4) По известным значениям $R_{я}$, R_m и λ по соотношениям (33) определяют общие сопротивления цепи якоря на каждой ступени R_1, R_2, \dots, R_{m-1} .

Величины сопротивлений, выключаемых на каждой ступени, находятся как разность значений общих сопротивлений на соседних ступенях:

$$\begin{aligned} R_{1,я} &= R_1 - R_{я} = R_{я} \cdot (\lambda - 1) \\ R_{2,1} &= R_2 - R_1 = R_{я} \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1) \\ &\dots\dots\dots \\ R_{m,m-1} &= R_m - R_{m-1} = R_{я} \cdot \lambda^{m-1} \cdot (\lambda - 1) \end{aligned} \quad (37)$$

Для асинхронного двигателя возможна замена естественной механической характеристики прямой линией при работе двигателя со скольжением от 0 до $S = 1,2 - 1,5S_n$. Это имеет место при нормальной работе двигателя и при реостатном пуске, когда двигатель разгоняется по прямолинейным участкам ряда механических характеристик. Тогда в формуле (28) можно пренебречь отношением S/S_k по сравнению с отношением S_k/S . В результате механическая характеристика двигателя будет иметь вид линейной зависимости момента от скольжения:

$$M = \frac{2M_k}{S_k} S = CS. \quad (38)$$

На естественной механической характеристике коэффициент C равен:

$$C = \frac{M_n}{S_n}, \quad (39)$$

а на искусственной механической характеристике:

$$C' = \frac{CR_2}{(R_2 + R_{доб})}, \quad (40)$$

где R_2 – активное сопротивление обмотки ротора;

$R_{доб}$ – дополнительное сопротивление в цепи ротора.

Внутреннее сопротивление фазы роторной обмотки R_2 и номинальное сопротивление ротора $R_{2н}$ определяют по паспортным данным двигателя:

$$R_2 = R_{2н} S_n, \quad (41)$$

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}}, \quad (42)$$

где $E_{2н}$ – ЭДС неподвижного разомкнутого ротора,

$I_{2н}$ – номинальный ток ротора.

Рассмотрим построение искусственной механической характеристики АД при изменении дополнительного активного

сопротивления в цепи ротора $R_{доб}$. Как известно, сопротивление $R_{доб}$ изменяет критическое скольжение в соответствии с формулой:

$$S_k = \frac{R_2' + R_{доб}'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (43)$$

и не оказывает влияния на величину критического момента M_k .

На рис. 4 приведены примерные естественная и искусственная механические характеристики АД.

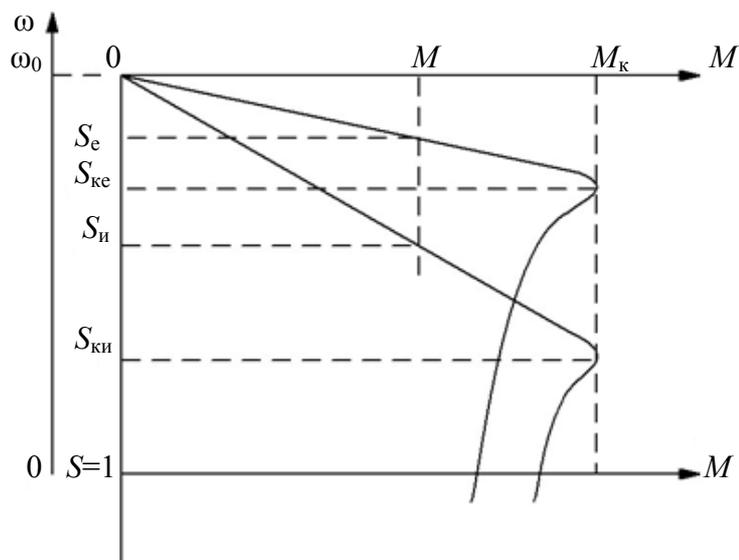


Рис. 4. Естественная и искусственная механические характеристики АД

Для любого i -го значения момента $M_e = M_i = M$ указаны значения скольжения на этих характеристиках S_e , S_i . Аналогично показаны значения критического скольжения $S_{ке}$ и $S_{ки}$. На основании формулы (28) имеем:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_e}{S_{ке}} + \frac{S_{ке}}{S_e}} = \frac{2M_k}{\frac{S_i}{S_{ки}} + \frac{S_{ки}}{S_i}}, \quad (44)$$

откуда

$$\frac{S_e}{S_{ке}} + \frac{S_{ке}}{S_e} = \frac{S_i}{S_{ки}} + \frac{S_{ки}}{S_i}. \quad (45)$$

Это равенство имеет место при условии:

$$\frac{S_e}{S_{ке}} = \frac{S_i}{S_{ки}} \quad (46)$$

или

$$S_i = S_e \frac{S_{ке}}{S_{ки}}. \quad (47)$$

Подставляя сюда значения S_k в соответствии с формулой (47), получаем формулу для расчета искусственной характеристики:

$$S_{и} = S_e \cdot \frac{R_2 + R_{доб}}{R_2} = S_e \cdot \frac{R_2' + R_{доб}'}{R_2'} \quad (48)$$

Таким образом, для построения любой искусственной механической характеристики нужно иметь естественную или какую-либо искусственную характеристику и соответствующее ей значение активного сопротивления цепи ротора. Задаваясь значением скольжения на известной характеристике, по формуле (48) находят скольжение на расчетной характеристике при том же значении момента. Построение проводят во всем диапазоне изменения скольжения.

5.14. Режим торможения противовключением имеет место там, где схема включения двигателя изменяет направление тока якоря, возникает тормозной момент M_T , снижающий скорость вращения вала двигателя. На рис. 5 в качестве примера представлена схема торможения противовключением электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

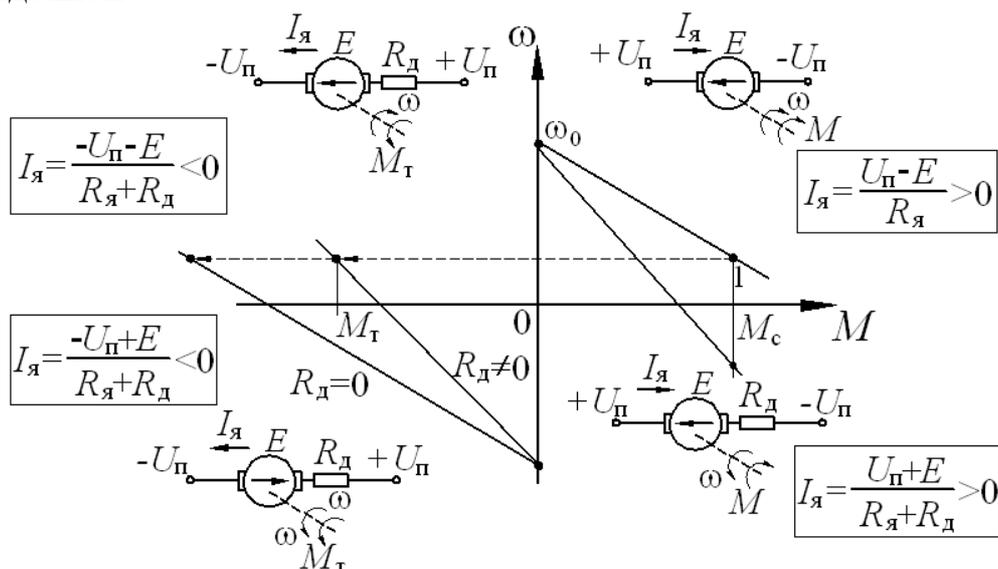


Рис. 5. Схема торможения противовключением ДПТ с НВ

Подобный режим практически возможен лишь при введении в цепь якоря достаточно большого сопротивления R_d , в противном случае через двигатель пройдет недопустимо большой ток.

5.15. При динамическом торможении якорь двигателя отключается от сети и замыкается на тормозное сопротивление R_T (рис. 6).

Для данного вида торможения создаются условия работы двигателя, когда механическая энергия, которой обладает якорь двигателя,

преобразуется в электрическую и далее в механическую, в результате возникает тормозной момент M_T . Так как $U_{\Pi} = 0$, то:

$$\omega_0 = \frac{U_{\Pi}}{C\Phi} = 0, \quad (49)$$

$$\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{т}}}{C^2\Phi^2} M. \quad (50)$$

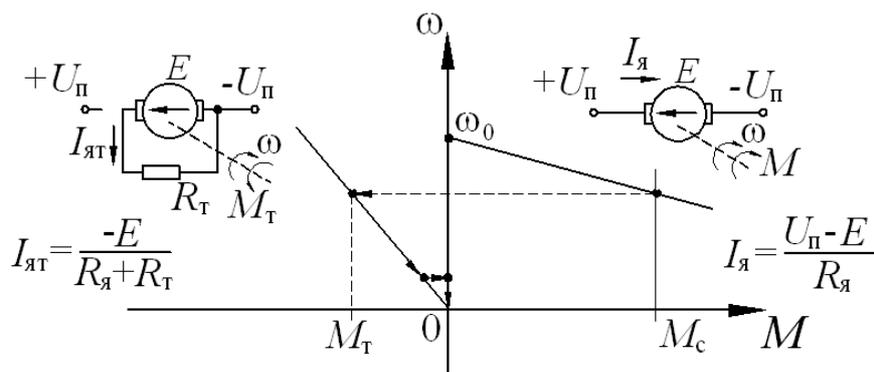


Рис. 6. Схема динамического торможения ДПТ с НВ

5.16. В качестве примера на рис. 7 представлена электрическая принципиальная схема силовой части привода, построенного на двигателе постоянного тока с независимым возбуждением.

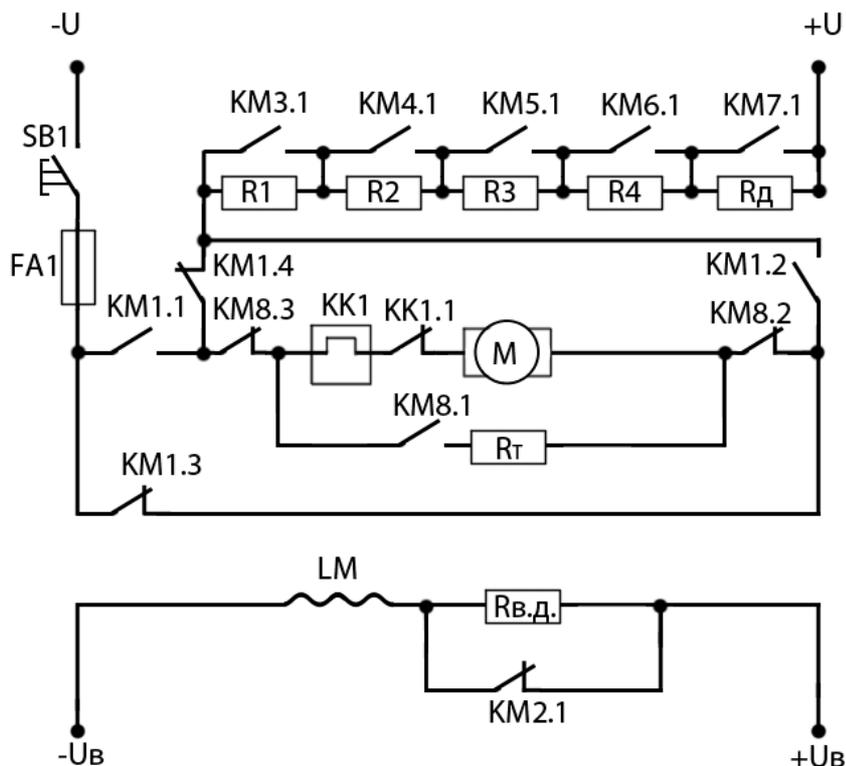


Рис. 7. Вариант электрической принципиальной схемы силовой части привода на основе ДПТ с НВ

В схеме предусмотрена защита по току (FAI) и защита от перегрузки двигателя (KKI). Описание схемы целесообразно приводить совместно с описанием принципа работы системы управления (см. п. 5.18).

На рис. 8 представлена схема управления асинхронным двигателем с реверсивным магнитным пускателем, тепловой и максимально-токовой защитой.

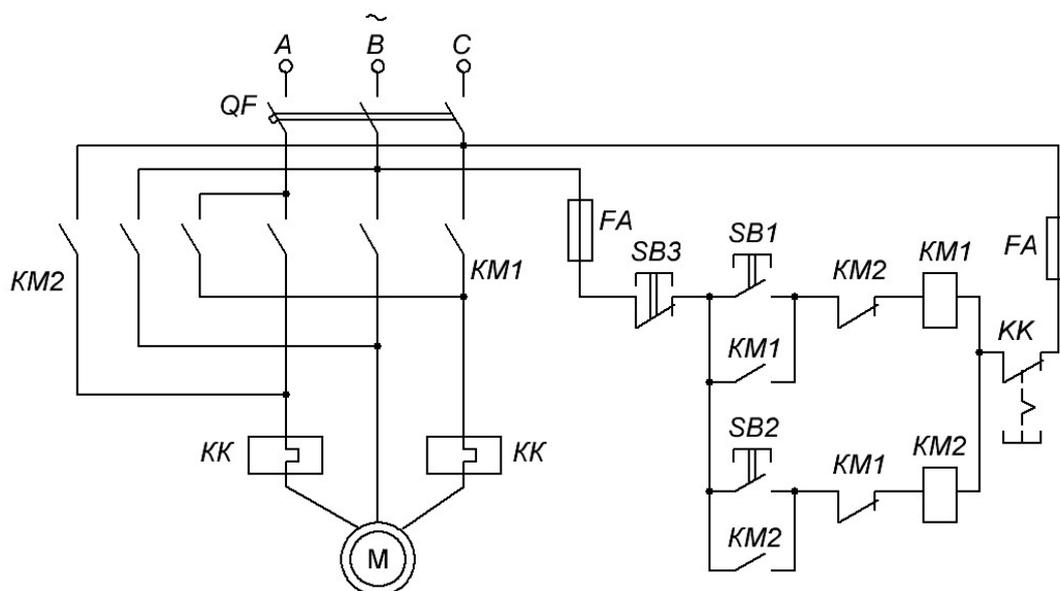


Рис. 8. Вариант схемы управления асинхронным двигателем

Схема включает автоматический выключатель QF , реверсивный магнитный пускатель с тепловой защитой и кнопки управления $SB1$ (*Вперед*), $SB2$ (*Назад*), $SB3$ (*Стоп*). Защита цепей управления осуществляется предохранителями FA по принципу максимально-токовой защиты.

Схема обеспечивает дистанционный пуск, реверсирование и останов, защиту двигателя от перегрузки, защиту от самозапуска.

Магнитный пускатель состоит из двух контакторов переменного тока $KM1$ и $KM2$ с главными и вспомогательными контактами (блок-контактами) и тепловыми реле KK с размыкающим контактом.

Для пуска двигателя оператор нажимает на кнопку $SB1$, либо $SB2$. Катушка $KM1$ (либо $KM2$) получает питание, контактор срабатывает, включая контакты в цепи статора, и блокирует пусковую кнопку. Двигатель разгоняется. При перегрузке (если ток статора длительно превышает 1,1...1,2 номинального значения) срабатывают тепловые реле KK , отключая своим контактом цепь питания катушки. В схеме предусмотрена электрическая блокировка от одновременного включения контакторов.

Для остановки оператор нажимает на кнопку $SB3$ (*Стоп*). Автоматический выключатель QF с электродинамическим расцепителем используется для защиты от коротких замыканий. Магнитные пускатели

как правило, трехполюсные, их выбирают по величине номинального тока главных контактов и номинального напряжения. Предельный ток отключения главных контактов магнитных пускателей превышает номинальный в 8... 10 раз.

5.17. Принцип управления рационально построить на системе автоматического пуска и торможения в функции времени. Подобные схемы просты, имеют широкое распространение, элементы схемы широко представлены на рынке. К недостаткам схемы относится возможность отклонение от заданного закона движения при нагрузке, отличающейся от расчётной. В данном случае будем считать нагрузку идентичной расчётной.

5.18. В общем виде схему управления ДПТ в функции времени можно найти, например, в [9].

В качестве примера на рис. 9 представлена электрическая принципиальная схема системы управления двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (см. рис. 7) в релейно-контактном варианте.

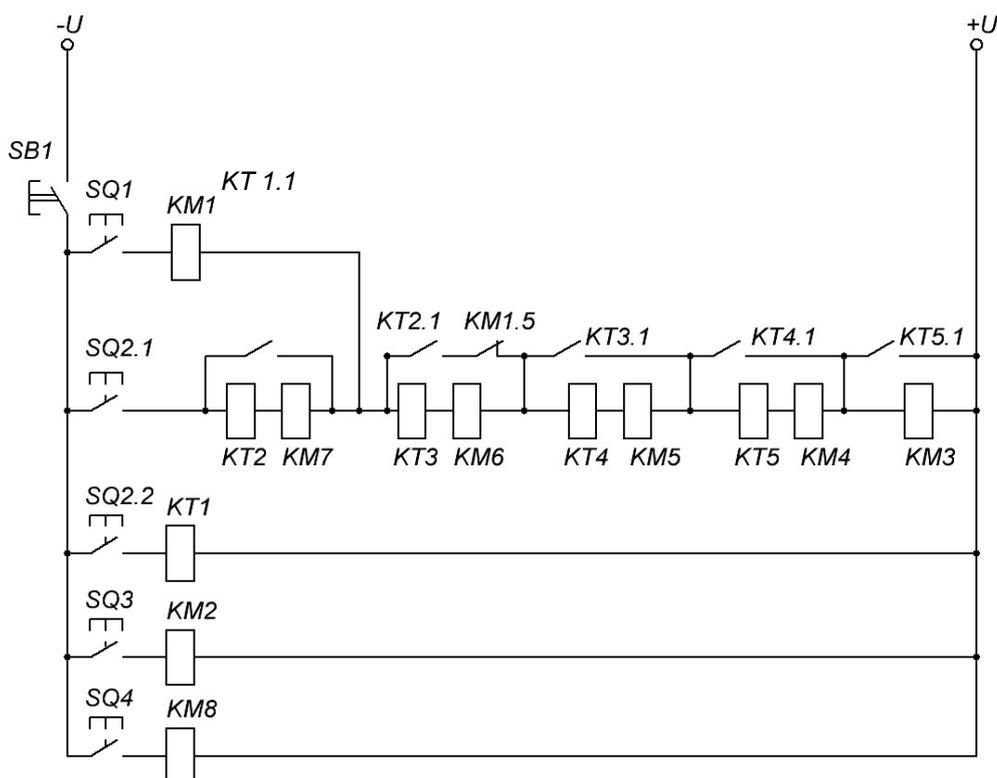


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема системы управления ДПТ с НВ в релейно-контактном варианте

В первоначальный момент времени контакты путевых выключателей *SQ1* и *SQ2.2* замкнуты, а *SQ2.1*, *SQ3* и *SQ4* – разомкнуты.

Пуск производится нажатием на кнопку *SB1*. Происходит подача тока на реле времени *KT1*, которое размыкает контакты *KT1.1*.

Параллельно через путевой выключатель *SQ1* срабатывает магнитный пускатель *KM1*, реверсирующий направление тока в цепи питания ДПТ и размыкающий шунтирование для *KT3* и *KM6*. В результате в цепь якорю включается сопротивление *R4* и подаётся ток на реле времени *KT3*, размыкающее контакт *KT3.1*, шунтирующий следующий участок цепи.

Далее аналогично в цепь якоря включаются сопротивления *R1 – R3*, при этом подаётся ток на реле времени *KT4*, *KT5* и на магнитные пускатели *KM5*, *KM4*, *KM3*, происходит запуск двигателя по искусственной характеристике до скорости ω_1 . Через время t_1 контакты *SQ1* и *SQ2.2* размыкаются, а *SQ2.1* замыкаются. Через реле времени *KT1* перестаёт течь ток и начинается отсчёт τ_1 (в течении этого времени контакт *KT1.1* остается разомкнутым). *KM1* возвращается в прежнее положение, отключая реверсирование тока и шунтирование участка цепи контактом *KT1.5*. Подается ток на *KT2* и размыкается контакт *KT2.1*, шунтирующий следующий участок цепи (контакт *KM1.5* так же разомкнут из-за отсутствия тока на *KM1*). Срабатывает *KM7* и подключает добавочное сопротивление (контакт *KM7.1*). Далее аналогично в цепь якоря включаются сопротивления *R1 – R4*. Начинается торможение двигателя.

По истечении времени τ_1 замыкается контакт *KT1.1* и шунтируется *KT2* и *KM7*. Начинается отсчёт времени τ_2 и шунтируется добавочное сопротивление контактами *KM7.1*. По истечении времени τ_2 шунтируется *KT3* и *KM6*, начинается отсчёт времени τ_3 и шунтируются сопротивление *R4*, далее аналогично шунтируются сопротивления *R1 – R3* и двигатель переходит на естественную характеристику и разгоняется до скорости ω_2 .

Через время t_2 контакт *SQ2.1* размыкается, а *SQ3* и *SQ2.2* замыкаются. Срабатывает *KM2* и размыкает *KM2.1*, в цепь возбуждения включается $R_{в.д.}$. В результате происходит уменьшение магнитного потока и разгон до скорости ω_3 .

Через время t_3 контакт *SQ3* размыкается, а *SQ4* замыкаются. Срабатывает *KM8*, контакты *KM8.2* и *KM8.3* отключают двигатель от питания, а контакт *KM8.1* параллельно двигателю включает сопротивление R_T . Начинается динамическое торможение.

В схеме управления асинхронным двигателем, обеспечивающей прямой пуск и динамическое торможение в функции времени пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB1* (рис. 9), после чего срабатывает линейный контактор *KM*, подключающий двигатель к источнику питания. Начинается прямой (без токоограничения) пуск двигателя. Одновременно с этим замыкание контакта *KM* в цепи реле времени *KT* вызовет его срабатывание и замыкание его контакта в цепи контактора торможения *KM1*. Однако последний не срабатывает, так как

6. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, И. И. Электрические машины : учеб. пособие / И. И. Алиев. – М.: ИП «РадиоСофт», 2011. – 446 с.
2. Вилков, П. В. Релейно-контакторные схемы управления : метод. указ. для сам. раб. студентов по курсу «Системы управления электроприводами» / П. В. Вилков. – Иваново.: УИУНЛ ИГЭУ, 2009. – 40с.
3. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – Введ. 2009-01-01. – М. : Стандарт информ, 2008. – 18 с.
4. Епифанов, А. П. Основы электропривода: учеб. пособие / А. П. Епифанов. – СПб.: Лань, 2009. – 191 с.
5. Желтоногов, А. П. Электропривод в системах управления. В 2 ч. Ч.2.: лабораторный практикум / А. П. Желтоногов, Л. Б. Иванов, Е. В. Коровина; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК "Политехник", 2006. – 96 с.
6. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 697 с.
7. Москаленко, В. В. Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко; М.: «Академия», 2007. –362 с.
8. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: учебное пособие / Л.С. Удут, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. – Издание 2-е переработанное и дополненное.– Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007.– 152 с.
9. Сергеев, А. С. Основы автоматизированного электропривода : учеб. пособ.(гриф). Доп. УМО вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) / А. С. Сергеев, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. - 114 с.
10. Справочник по электрическим машинам / Под ред. И. П. Копылова, В. К. Ключева, т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с., т.2.,1989. – 688 с.
11. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. для вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.