

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

О.Ю. Приходько, Н.А. Корнилова, В.В. Фролов

Основы электропривода

*Методические рекомендации к выполнению расчетно-графического задания
для студентов направления бакалавриата 13.03.02 - Электроэнергетика и
электротехника, специальности 15.05.01 – Проектирование технологических
машин и комплексов*

Белгород
2020

УДК 621.34
ББК 31.291-04

УДК

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения
вычислительной техники и автоматизированных систем Белгородского
государственного технологического
университета им. В.Г. Шухова,
Кабалянц П.С.

УДК Основы электропривода: методические рекомендации к
выполнению расчетно-графического задания для студентов
направления бакалавриата 13.03.02 - Электроэнергетика и
электротехника / сост. О.Ю.Приходько, Н.А.Корнилова,
В.В.Фролов В.В.– Белгород: Изд-во БГТУ, 2020.-43с.

Методические рекомендации предназначены к выполнению расчетно –
графического или индивидуального задания для студентов направления
подготовки бакалавриата 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника,
специальности 15.05.01 – Проектирование технологических машин и
комплексов очной формы обучения.
Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 621.34
ББК 31.291-04

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2020

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Целью расчетно-графического задания (РГЗ) является закрепление и систематизация знаний по дисциплинам “Основы электропривода”, “Электрические машины и электропривод”, и получение навыков самостоятельной работы с использованием учебной и справочно-технической литературы.

Расчетно-графическое задание выполняется по темам «Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением», «Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)», «Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя», «Принципы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя (АД)» с индивидуальными заданиями для каждого студента.

Содержание и данные для выполнения расчетно-графического задания.

1. Рассчитать параметры и построить характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

2. Составить схему пуска и торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

3. Рассчитать параметры и построить характеристики асинхронного двигателя.

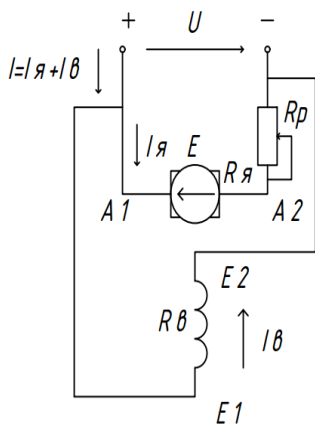
4. Составить схему пуска и торможения асинхронного двигателя.

Данные для выполнения пунктов 1 и 3 приведены в 1 и 3, соответственно разделах. Данные для выполнения пунктов 2 и 4 каждый студент получает индивидуально у преподавателя. Теоретические положения изложены в учебниках и разделах 2 и 4, примерные варианты заданий приведены там же.

Расчетно-графическое задание состоит из расчетно-пояснительной записки на 10–15 страницах машинописного текста, включающей графический материал. Оформление пояснительной записки и чертежей должно соответствовать требованиям стандарта ГОСТ 2.710-81 “Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах”, ГОСТ 2.755-87 “Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения”, ГОСТ 2.722-68 “Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические”, ГОСТ 2.728-74 “Обозначения условные графические в схемах. Резисторы и конденсаторы”.

1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЙ

1.1 Задание 1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением



На рис.1 изображена электрическая схема включения двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.

Варианты паспортных данных этих двигателей приведены табл.1, где $P_{2ном}$, $U_{ном}$, $\eta_{ном}$, $n_{ном}$ – соответственно, номинальные мощность, напряжение, КПД и частота вращения; $R_{я}$ – сопротивление цепи якоря; $R_{в}$ – сопротивление обмотки возбуждения.

Рис.1.1. Электрическая схема включения ДПТ с параллельным возбуждением

Для заданного варианта данных

необходимо выполнить:

1. Для номинального режима работы определить ток $I_{ном}$, потребляемый двигателем из сети; ток возбуждения $I_{в.ном}$; суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P_{ном}$; электромагнитную мощность $P_{эм.ном}$; электродвигательную силу (ЭДС) $E_{ном}$.

2. Определить частоту вращения якоря n_0 в режиме идеального холостого хода.

3. Построить естественную механическую характеристику $n(M)$, где n , M – частота вращения и вращающий момент якоря.

4. Аналитически или графически, используя построенную в п.3 характеристику $n(M)$, определить частоту вращения якоря при вращающем моменте $M = 0,6 M_{ном}$.

5. Построить искусственную механическую характеристику $n(M)$ при номинальном напряжении $U_{ном}$, если в цепь якоря ввести регулировочный реостат с сопротивлением $R_p = 2,5 R_{я}$ (рис.1).

6. Определить сопротивление R_p регулировочного реостата, который нужно включить в цепь якоря (рис. 2) для ограничения пускового тока якоря до $I_{я.пуск} = 2,4 I_{я.ном}$, если двигатель включается при пуске на номинальное напряжение $U_{ном}$.

7. Найти величину напряжения питания при пуске $U_{пуск}$, до которой его надо снизить при включении двигателя, чтобы пусковой ток якоря $I_{я.пуск}$ не превысил бы $I_{я.пуск} = 2,3 I_{я.ном}$ без включения дополнительных сопротивлений.

**Таблица 1.1. Параметры двигателя постоянного тока с
параллельным возбуждением**

№ вари анта	Мощность, кВт	Напряжение , В	Частота вращения, об/мин	КПД	Сопротивл. цепи якоря, Ом	Сопротивл. обмотки возбужден., Ом
	P_{2 ном}	U_{ном}	n_{ном}	η_{ном}	R_я	R_в
1	4	220	900	0,723	1,60	191
2	3,15	220	750	0,693	2,38	255
3	2	220	450	0,576	3,16	199
4	4,25	220	730	0,680	1,61	110
5	3	220	475	0,603	3,14	139
6	3,55	220	425	0,601	2,67	117
7	15	220	1400	0,779	0,37	103
8	7,5	220	1000	0,760	0,79	175
9	6	220	875	0,740	0,80	85
10	4,25	220	580	0,650	1,84	105
11	11	220	1060	0,785	0,45	100
12	8,5	220	875	0,760	0,62	98
13	8	220	600	0,680	0,85	58
14	11	220	800	0,760	0,48	73
15	8,5	220	515	0,680	0,93	91
16	15	220	850	0,807	0,21	45
17	11	220	530	0,705	0,56	46
18	15	220	580	0,753	0,34	44
19	17	220	500	0,730	0,33	34
20	20	220	475	0,750	0,26	32
21	7,5	440	2120	0,871	1,54	1124
22	5,5	440	1450	0,814	3,06	964
23	4,25	440	975	0,740	5,93	971
24	3,14	440	730	0,690	9,64	994
25	7,5	440	1450	0,825	1,54	414
26	5,5	440	900	0,741	4,96	1304
27	4,25	440	690	0,674	6,62	438
28	10	440	1320	0,812	1,23	260
29	7,5	440	975	0,810	2,53	1045
30	5,5	440	690	0,708	5,24	671

1.2 Задание 2. Составить схему пуска и торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Для успешного выполнения этой части задания необходимо: изучить соответствующие разделы учебников и методических рекомендаций; разобрать типовые примеры, приведенные в учебниках и методическом пособии по теме РГЗ. Конкретный вариант задания каждый студент индивидуально получает у преподавателя.

Примерные варианты заданий по составлению схем пуска и торможения ДПТ НВ

1. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции тока и динамическое торможение в функции скорости.
2. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции тока и торможение противовключением в функции времени.
3. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции ЭДС и торможение противовключением в функции времени.
4. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции времени и торможение противовключением в функции скорости.
5. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции ЭДС и динамическое торможение в функции скорости.
6. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции времени и динамическое торможение в функции времени.
7. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции ЭДС и торможение противовключением в функции ЭДС.
8. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции времени и торможение противовключением в функции времени.
9. Пуск ДПТ НВ в 2 ступени в функции времени динамическое торможение в функции ЭДС.
10. Пуск ДПТ НВ в 1 ступень в функции тока и торможение противовключением в функции времени.
11. Пуск ДПТ НВ в 1 ступень в функции тока и торможение противовключением в функции ЭДС.
12. Пуск ДПТ НВ в 1 ступень в функции тока и динамическое торможение в функции времени.
13. Пуск ДПТ НВ в 1 ступень в функции тока и динамическое торможение в функции ЭДС.

1.3 Задание 3. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя

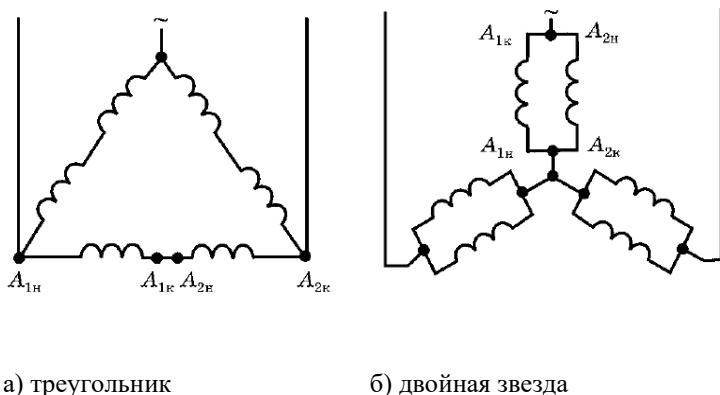


Рис.1.2. Схемы включения обмоток АД

Электрическая схема трехфазного асинхронного двигателя изображена на рис.4. Варианты данных этих двигателей приведены в табл.3. Номинальное напряжение этих двигателей 220/380 В (фазное/линейное) при частоте $f=50$ Гц. В табл.3: $P_{2ном}$ – номинальная мощность; p -число пар полюсов, созданных обмоткой статора; $S_{ном}$ – номинальное скольжение; $\lambda_M = M_{max}/M_{ном}$ – перегрузочная способность по вращающему моменту (M_{max} , $M_{ном}$ – его максимальное и номинальное значения); $\lambda_I = I_{пуск}/I_{ном}$ – кратность пускового тока ($I_{пуск}$, $I_{ном}$ – пусковое и номинальное значения тока, потребляемого из сети); $\cos\phi_{1ном}$ – номинальный коэффициент мощности. Также задана схема соединения обмоток статора (Y – звезда, рис.4,а, Δ – треугольник, рис.6,б). В соответствии с этими данными нужно выполнить:

1. Выбрать линейное напряжение питающей трехфазной сети U_c .
2. Определить синхронную частоту вращения поля статора n_1 , номинальную $n_{2ном}$ и критическую $n_{2кр}$ частоту вращения ротора.
3. Определить мощность $P_{1ном}$, которую двигатель потребляет из сети, и суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P_{ном}$ в номинальном режиме; номинальный $I_{ном}$ и пусковой $I_{пуск}$ токи двигателя, его номинальный $M_{ном}$ и максимальный M_{max} вращающие моменты.
4. Рассчитать и построить график зависимости $M(S)$, где M – вращающий момент, S – скольжение ротора. По этой зависимости

определить пусковой вращающий момент двигателя $M_{\text{пуск}}$ и кратность этого момента $k_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$.

5. Рассчитать и построить в одной координатной системе три механических характеристики – зависимости $n_2(M)$, где n_2 - частота вращения ротора:

а) естественную механическую характеристику при заданном напряжении сети U_c (как в п.3), а также определить по ней диапазон частот вращения ротора, при которых возможна устойчивая работа двигателя;

б) искусственную механическую характеристику при снижении напряжения питающей сети на 15%, то есть при $U = 0,85U_c$;

в) искусственную механическую характеристику при условии, что суммарное активное сопротивление в каждой фазе обмотки ротора стало в 2,2 раза большим, чем у двигателя, для которого рассчитаны предыдущие характеристики, то есть $R'_2 = 2,2R_2$ (это возможно, если бы данный двигатель был двигателем с фазным ротором (рис.5), и тогда бы в фазы обмотки ротора можно было бы включить регулировочные реостаты с сопротивлениями $R_p = 1,2R_2$); при этом индуктивное сопротивление фаз обмотки ротора X_{20} не меняется; напряжение сети считать равным U_c .

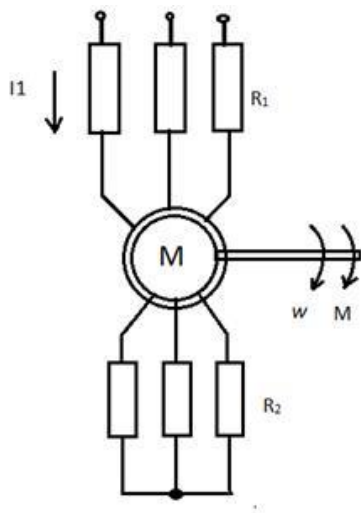


Рис. 1.3 Асинхронный двигатель с фазным ротором

Таблица 1.2 Параметры асинхронного двигателя

№ варианта	Схема соединения обмотки	Мощность, кВт	Число пар полюсов	Номинальное скольжение	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	КПД	Коэффициент мощности
		$P_{2 ном}$	p	$s_{ном}$	λ_M	λ_I	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{1 ном}$
1	Δ	0,09	1	0,086	2,2	5,0	0,600	0,700
2	Y	0,12	1	0,097	2,2	5,0	0,630	0,700
3	Δ	0,18	1	0,080	2,2	5,0	0,660	0,760
4	Y	0,25	1	0,080	2,2	5,0	0,680	0,770
5	Δ	0,37	1	0,083	2,2	5,0	0,700	0,860
6	Y	0,55	1	0,085	2,2	5,0	0,730	0,860
7	Δ	0,75	1	0,080	2,2	5,5	0,770	0,870
8	Y	1	1	0,065	2,2	5,5	0,720	0,870
9	Δ	1,1	1	0,075	2,2	5,5	0,775	0,870
10	Y	1,5	1	0,072	2,2	6,5	0,810	0,850
11	Δ	2,2	1	0,069	2,2	6,5	0,830	0,870
12	Y	3	1	0,067	2,2	6,5	0,845	0,880
13	Δ	4	1	0,065	2,2	7,5	0,865	0,890
14	Y	5,5	1	0,064	2,2	7,5	0,875	0,910
15	Δ	11	1	0,050	2,4	7,5	0,840	0,890
16	Y	0,09	2	0,086	2,2	5,0	0,550	0,600
17	Δ	0,12	2	0,080	2,2	5,0	0,630	0,660
18	Y	0,18	2	0,087	2,2	5,0	0,640	0,640
19	Δ	0,25	2	0,080	2,2	5,0	0,680	0,650
20	Y	0,37	2	0,090	2,2	5,0	0,680	0,690
21	Δ	0,55	2	0,087	2,2	4,5	0,705	0,700
22	Y	0,75	2	0,087	2,2	4,5	0,720	0,730
23	Δ	1,1	2	0,067	2,2	5,0	0,750	0,810
24	Y	1,5	2	0,067	2,2	5,0	0,770	0,830
25	Δ	2,2	2	0,066	2,2	6,0	0,800	0,830
26	Y	3	2	0,066	2,2	6,5	0,820	0,830
27	Δ	4	2	0,065	2,2	6,0	0,840	0,840
28	Y	5,5	2	0,065	2,2	7,0	0,855	0,860
29	Δ	7,5	2	0,064	2,2	7,5	0,875	0,860
30	Y	11	2	0,060	2,4	7,5	0,875	0,870

1.4 Задание 4. Составить схему пуска и торможения асинхронного двигателя.

Для успешного выполнения этой части задания необходимо: изучить соответствующие разделы учебников и методических рекомендаций; разобрать типовые примеры, приведенные в учебниках и методическом пособии по теме РГЗ. Конкретный вариант задания каждый студент индивидуально получает у преподавателя.

Примерные варианты заданий по составлению схем пуска и торможения АД

1. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции тока и динамическое торможение в функции скорости.
2. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции тока и торможение противовключением в функции времени.
3. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции ЭДС и торможение ротивовключением в функции времени.
4. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции времени и торможение противовключением в функции скорости.
5. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции ЭДС и динамическое торможение в функции скорости.
6. Пуск АД с ФР в 2 ступени в функции времени и динамическое торможение в функции времени.
7. Пуск АД с ФР в 1 ступень в функции тока и торможение противовключением в функции времени.
8. Пуск АД с ФР в 1 ступень в функции тока и торможение противовключением в функции ЭДС.
9. Пуск АД с ФР в 1 ступень в функции тока и динамическое торможение в функции времени.
10. Пуск АД с ФР в 1 ступень в функции тока и динамическое торможение в функции ЭДС.
11. Прямой пуск АД с КР и торможение противовключением в функции ЭДС.
12. Прямой пуск АД с КР и торможение противовключением в функции времени.
13. Прямой пуск АД с КР и динамическое торможение в функции ЭДС.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

У двигателя параллельного возбуждения обмотки якоря и возбуждения подключены к одному источнику питания, и напряжение на них одинаковое. Следовательно, двигатель параллельного возбуждения можно рассматривать как двигатель независимого возбуждения при $U_{\text{я}} = U_{\text{в}}$.

Механические характеристики двигателей принято подразделять на естественные и искусственные.

Естественной электромеханической (механической) характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя ω от его тока якоря I (момента M), полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя.

Искусственной электромеханической (механической) характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя ω от его тока якоря I (момента M), полученную при параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения отличных от номинальных и/или наличия добавочных сопротивлений в цепях двигателя.

Естественная электромеханическая характеристика рассчитывается по уравнению:

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - I \cdot \frac{R_{\text{я}}}{c}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.1)$$

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока строится по выражению:

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - M \cdot \frac{R_{\text{я}}}{c^2}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.2)$$

Еще один вариант представления формулы механической характеристики

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot R_{\text{я}} = n_0 - CM R_{\text{я}}. \quad (2.3)$$

Частота вращения при холостом ходе ($M=0$)

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}}. \quad (2.4)$$

Постоянная двигателя

$$C = \frac{I_{\text{я,ном}} n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} M_{\text{ном}}}. \quad (2.5)$$

Механические характеристики двигателей принято оценивать по трем показателям: устойчивости, жесткости и линейности.

Механическая характеристика линейная, отклонение от линейного закона может быть вызвано реакцией якоря, приводящей к изменению потока Φ . Эта характеристика жесткая, так как при изменении момента нагрузки и соответственно скорости поток возбуждения не изменяется. Жесткость характеристики уменьшается при введении добавочного сопротивления в цепь якоря. Характеристики устойчивые, так как $d\omega/dM < 0$, и обеспечивают саморегулирование двигателя, т.е. он автоматически приспосабливается к изменяющейся нагрузке. Увеличение статического момента сопротивления на валу двигателя приводит к уменьшению угловой скорости и ЭДС якоря. По аналогии может быть построено семейство искусственных характеристик при различных значениях U и Φ .

Рис.

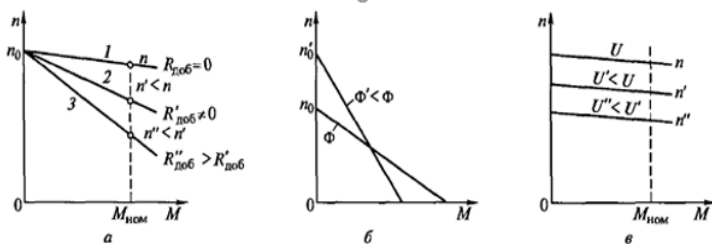


Рис.2.1. Механические характеристики ДПТ независимого (параллельного) возбуждения: а-при изменении $R_{\text{д}}$; б- при изменении Φ ; в – при изменении U .

Рабочие характеристики двигателя – это зависимости угловой скорости ω , электромагнитного $M_{\text{эм}}$ и полезного M_2 моментов и кпд η от полезной механической мощности на валу двигателя $P_2 = M_2 \omega$ при

номинальном напряжении питания и отсутствии добавочных сопротивлений.

Мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}; \quad (2.6)$$

Ток, потребляемый двигателем из сети

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \quad (2.7)$$

Ток обмотки возбуждения и ток якоря

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{в}}}; \quad (2.8)$$

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в.ном}}. \quad (2.9)$$

Суммарные потери мощности в двигателе

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}}. \quad (2.10)$$

ЭДС якоря

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}}. \quad (2.11)$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эмном}} = E_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я.ном}}. \quad (2.12)$$

Вращающий электромагнитный и полезный моменты

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{эмном}}}{n_{\text{ном}}}, \quad (2.13)$$

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}. \quad (2.14)$$

Частота вращения якоря n_0 в режиме идеального холостого хода определяется из базовой формулы механической характеристики

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot R_{\text{я}} = n_0 - CM R_{\text{я}}. \quad (2.15)$$

Частота вращения при холостом ходе ($M=0$)

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}}. \quad (2.16)$$

Постоянная двигателя

$$C = \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}}. \quad (2.17)$$

Естественная механическая характеристика является прямой линией, которая может быть построена по двум точкам: точке А с координатами ($M=0$; $n=n_0$) и точке В с координатами ($M=M_{\text{ном}}$; $n=n_{\text{ном}}$)

Искусственная механическая характеристика при включении регулировочного реостата с сопротивлением R_p при сохранении $U=U_{\text{ном}}$ определяется по базовой формуле

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot (R_{\text{я}} + R_p) = n_0 - CM(R_{\text{я}} + R_p), \quad (2.18)$$

где частота вращения якоря при холостом ходе n_0 и постоянная двигателя C сохраняются такими же как и для естественной механической характеристики.

Искусственная механическая характеристика также является прямой линией, которая также строится по двум точкам.

Точка А с координатами ($M=0$; $n=n_0$).

Для второй точки С при номинальном моменте рассчитаем частоту вращения

Сопротивление регулировочного реостата при $U_{\text{ном}}$ определяется по формуле для тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_p} = 2,4 I_{\text{я.ном}}. \quad (2.19)$$

После преобразования

$$R_p = \frac{U_{\text{ном}}}{2,4 I_{\text{я.ном}}} - R_{\text{я}} \quad (2.20)$$

Величина напряжения питания при пуске $U_{\text{пуск}}$, до которой его надо снизить при включении двигателя, чтобы пусковой ток якоря $I_{\text{я пуск}}$ не превысил бы $I_{\text{я пуск}} = 2,3 I_{\text{я.ном}}$ без включения дополнительных сопротивлений определяется из формулы для тока якоря

$$U_{\text{пуск}} = 2,3 \cdot I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}} \quad (2.21)$$

Построение механических характеристик двигателя позволяет наглядно представить себе процессы пуска, торможения, реверса, регулирования угловой скорости.

2.2. Автоматическое управление двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Автоматическое управление пуском и торможением двигателя постоянного тока обычно осуществляется по принципу времени, скорости и тока.

Реверс двигателя осуществляется с помощью мостовой схемы включения силовых контактов контакторов КВ1, КВ2, КН1, КН2, что позволяет изменять полярность напряжения, подводимого к якору (рис. 2.2 и 2.3).

Два пусковые резистора R1 и R2, включенные последовательно с якром двигателя для ограничения пускового тока, закорачиваются с помощью силовых контактов контакторов ускорения К1 и К2.

Динамическое торможение осуществляется подключением якоря двигателя к резистору динамического торможения $R_{дт}$, с помощью силового контакта контактора торможения КГ.

При торможении противовключением в цепь якоря вводится для ограничения тока сопротивление $R_{п}$, которое управляется силовым контактом контактора торможения КГ (рис. 2.3). В схеме сопротивление $R_{доп}$ используется для регулирования напряжения срабатывания контактора ускорения К2.

В данных схемах используется двигатель с техническими данными: $U_n=115В$; $I_n=24 А$; $n=1530$ об/мин; $r_a=6,7\%$. Используемые аппараты управления: контакторы и реле постоянного тока с напряжением катушки 110 В.

Раздельное питание двигателя и схемы управления дает возможность испытывать схему управления при разомкнутой цепи якоря.

Амперметр в цепи якоря служит для наблюдения за током двигателя при наладке схемы. Пуск двигателя проводится при полном магнитном потоке, что достигается включением обмотки возбуждения непосредственно на напряжение сети. Защита двигателя и цепей управления от коротких замыканий осуществляется с помощью плавких предохранителей и автомата.

2.2.1 Схема управления пуском двигателя по принципу времени и динамическим торможением по принципу скорости

В начальном положении выключатели QF1 и QF2 (рис.2.2) включены. Напряжение подается на обмотку возбуждения двигателя. Включается первое реле ускорения КУ1 и размыкается его контакт 1-17 в цепи катушек контакторов ускорения К1 и К2.

Закрытый контакт 4-2 реле торможения КТ готовит цепь для включения контакторов KB1, KB2 или КН1, КН2. После нажатия на одну из пусковых кнопок SB1 или SB2 включаются контакторы KB1, KB2 или КН1, КН2 и начинается пуск двигателя. Пусковой ток создает падение напряжения на сопротивлении R1, вследствие чего включается реле КУ2 и его контакт 17-19 открывается. При включении контактора KB2 или КН2 соответственно размыкается блок-контакт 8-6 или 6-2, реле КУ1 теряет питание и с выдержкой времени закрывает свой контакт 1-17 в цепи катушки контактора К1.

Контактор К1 включается и закорачивает своим силовым контактом первую ступень сопротивления R1. При этом закорачивается также катушка реле КУ2; КУ2 с выдержкой времени замыкает контакт 17-19 в цепи катушки контактора К2. Контактор К2 срабатывает и закорачивает вторую ступень сопротивления R2. Двигатель начинает работать на естественной характеристике. Выдержка времени реле ускорения КУ1 та КУ2 регулируется с помощью пружин так, чтобы броски пускового тока при закорачивании ступеней пускового сопротивления были равны заданной величине.

В процессе разгона двигателя реле торможения КТ закрывает свой контакт 10-8 в цепи катушки контактора торможения КГ и открывает контакт 4-2, который шунтирует контакты KB2 и КН2, подготавливая схему к динамическому торможению. Реверс двигателя можно осуществить, нажав, например, кнопку SB2 при включенных контакторах KB1, KB2, К1 и К2. Эти контакторы отключаются, при этом закрывается контакт 8-6 контактора KB2 и включает контактор динамического торможения КГ, который замыкает своим контактом якорь двигателя на сопротивление Rдг.

Динамическое торможение заканчивается отключением реле КТ при низкой скорости. Реле КТ отключает своим контактом 10-8

контактор КГ, а контактом 4-2 включит контакторы КН1 и КН2, которые обеспечивают разгон двигателя в противоположную сторону, при котором аппараты срабатывают таким образом, как было описано ранее.

В рассмотренном тут процессе предусматривается, что кнопка SB2 остается в нажатом состоянии на протяжении всего времени торможения. Если это условие не выполняется, то в конце торможения двигатель остановится. Остановка двигателя осуществляется нажатием кнопки SB3. После этого реверсивные контакторы отключаются и происходит динамическое торможение двигателя.

В схеме есть блокировка контактами KB2, КН2 и КТ, что не допускает пуск двигателя при незаконченном торможении.

2.2.2 Схема управления пуском и торможением противовключения двигателя по принципу скорости

В начальном положении при включенных выключателях QF1 и QF2 (рис. 2.3) ни один из аппаратов не срабатывает. На обмотку возбуждения двигателя подается напряжение. После нажатия, например, на кнопку SB1, контакторы KB1 и KB2 получают питание и замыкают свои главные контакты, пуская двигатель в условном направлении «Вперед». Замыкающий контакт кнопки SB1 блокируется блоком-контактом 3-5 контактора KB1.

В первый момент в цепь якоря двигателя введены все сопротивления R1, R2, Rп. Однако после замыкания замыкающего блок-контакта контактора KB2 включается реле противовключения КПВ, которое своим контактом 7—17 включает контактор торможения КГ. КГ своим главным контактом закорачивает сопротивление противовключения Rп, а блок-контактом подключает катушки контакторов ускорения к цепи якоря. Происходит разгон двигателя по первой пусковой ступени.

Цепь катушки контактора КУ2 включена на напряжение, которое равно сумме падения напряжения в якоре и ЭДС двигателя. Так как в эту цепь введено еще дополнительное сопротивление Rдоп, то контактор К2 включается при большей скорости, чем контактор К1, и закорачивает вторую ступень пускового сопротивления R2. После этого двигатель переходит и дальше работает на естественной характеристике.

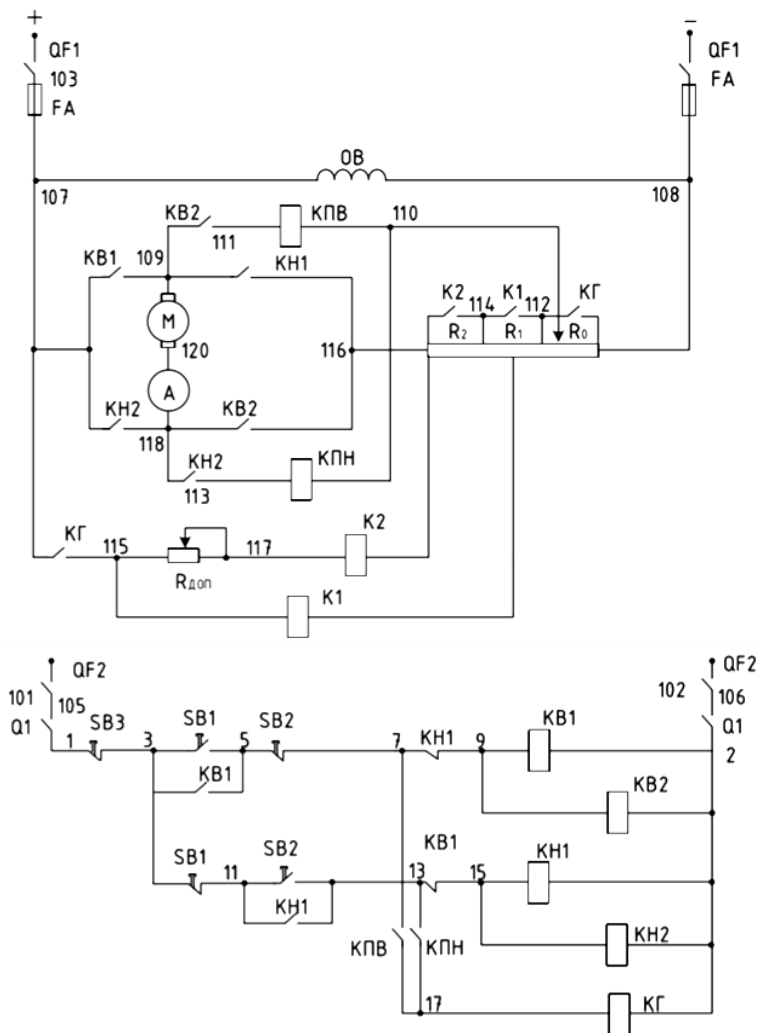


Рис. 2.3. Схема управления пуском и торможением
противовключения двигателя по принципу скорости.

Реверс можно осуществить нажатием кнопки SB2. При этом выключаются контакторы KB1 и KB2. Контактор KB2 замыкающим блоком-контактом отключает реле КПВ, которое, в свою очередь, отключает контактор КГ. Контактор КГ своим замыкающим блоком-контактом отключает контакторы ускорения K1 и K2.

В якорную цепь вводятся ступени пускового сопротивления R1, R2 и сопротивление противовключения Rп.

Замыкающийся контакт 13-15 контактора KB1, обеспечивает включение контакторов КН1 та КН2. Их главные контакты замыкаются в цепи якоря двигателя и двигатель переходит в режим торможения противовключением. Одновременно контактор КН2 замыкающим блоком-контактом подключает цепь катушки реле противовключения КПН, но оно не срабатывает, так как на катушке реле в начале торможения очень маленькое напряжение, что обусловлено правильным выбором точки присоединения реле (сопротивления Rх).

Во время снижения скорости двигателя напряжение на реле КПН растет. При скорости, приблизительно равной 20% от номинальной, реле КПН срабатывает и своим контактом 13-17 включает контактор КГ. Его главный контакт закорачивает сопротивление противовключения Rп. Это происходит уже при скорости, близкой к нулю (скорость успевает заметно уменьшиться за время срабатывания реле КПН и контактора КГ). Процесс торможения противовключением заканчивается.

Далее осуществляется пуск в противоположную сторону, при котором работа аппаратов аналогична описанной ранее. Остановка двигателя может осуществляться нажатием на кнопку SB3, что приводит к отключению реверсивных контакторов. Торможение двигателя при этом происходит под действием статического момента.

2.3. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя (Задание 3)

Для того чтобы определить возможности и способ применения асинхронного двигателя, необходимо знать его характеристики. Наиболее важные данные приводятся в паспорте двигателя. Паспорт, часто его называют «шильдик», двигателя представляет собой небольшую металлическую табличку, прикрепленную к корпусу двигателя.

Номинальные параметры двигателя — это параметры, которые двигатель сможет выдерживать в течении всего срока эксплуатации. К номинальным (паспортным) данным двигателя относятся:

- мощность на валу или механическая $P_{2\text{ном}}$;
- частота напряжения сети f ;
- номинальное скольжение $S_{\text{ном}}$;
- номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$
- коэффициент мощности $\cos\varphi_{1\text{ном}}$.

В паспорте АД обычно приводят два значения напряжения $U_{\text{ф}}/U_{\text{л}}$, например, 380/220 В. Меньшее значение напряжения (220 В) это фазное напряжение обмотки статора. Большее значение напряжения - линейное. В каталогах приводят также: кратность пускового тока $\lambda_I = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ном}}}$; кратность максимального момента $\lambda_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$.

Кратность максимального момента называется перегрузочной способностью двигателя. Для АД с фазным ротором указывают в паспорте также напряжение между контактными кольцами при разомкнутой обмотке ротора $U_{2\text{н}}$ и номинальный ток в обмотке ротора $I_{2\text{н}}$. Величина, характеризующая степень отставания скорости вращения ротора АД n от синхронной скорости n_1 называется скольжением s .

При соединении обмоток статора звездой $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$, где $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$ – соответственно линейное и фазное напряжение обмотки статора. Поэтому линейное напряжение сети

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} \quad (2.22)$$

Синхронная частота вращения поля статора n_1

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.23)$$

Номинальная частота вращения ротора

$$n_{2\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - S_{\text{ном}}) \quad (2.24)$$

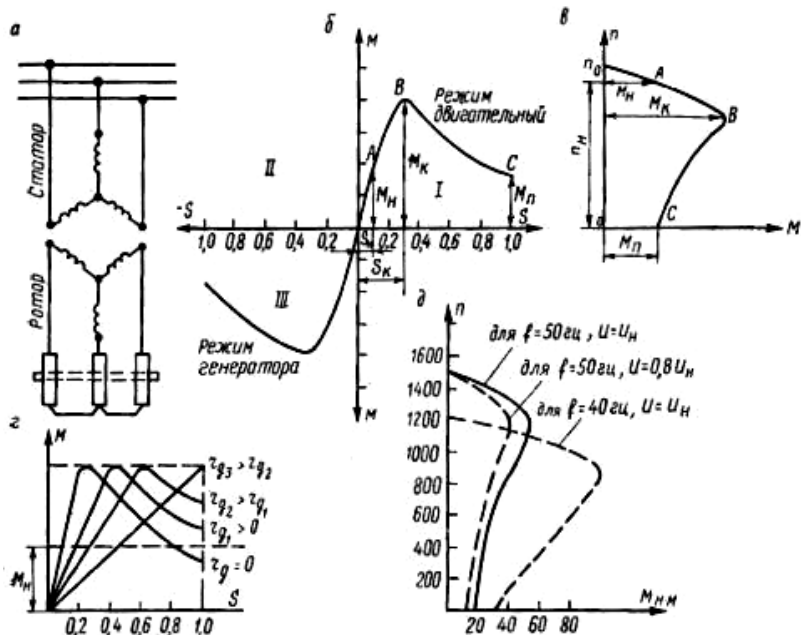


Рис. 2.4. Асинхронный двигатель: а — принципиальная схема, б — механическая характеристика $M=f(S)$ — естественная в двигательном и генераторном режимах, в — естественная механическая характеристика $n=f(M)$ в двигательном режиме, г — искусственные реостатные механические характеристики, д — механические характеристики для различных напряжений и частот.

Механические характеристики асинхронных двигателей могут быть выражены в виде зависимости $M = f(S)$, где S — скольжение. На практике для графического построения механической характеристики пользуются упрощенной формулой, называемой формулой Клосса:

$$M_{\Pi} = \frac{2M_K}{\frac{S_K}{S_{\Pi}} + \frac{S_{\Pi}}{S_K}} \quad (2.25)$$

где: M_K - критическое (максимальное) значение момента.

Этому значению момента отвечает критическое скольжение

$$s_k = s_n \left[\frac{M_k}{M_n} \pm \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_n} \right)^2 - 1} \right] = s_n [\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1}] \quad (2.26)$$

Формула Клосса применяется при решении вопросов, связанных с электроприводом, осуществляемым с помощью асинхронного двигателя. Пользуясь формулой Клосса можно построить график механической характеристики по паспортным данным асинхронного двигателя. Для практических расчетов в формуле при определении критического момента перед корнем следует принимать во внимание только знак плюс (что соответствует двигательному режиму).

Как видно из рис.2.4,б, механическая характеристика асинхронного двигателя располагается в I и III квадрантах. Часть кривой в I квадранте соответствует положительному значению скольжения и характеризует двигательный режим работы асинхронного двигателя, а в III квадранте — генераторный режим.

График механической характеристики двигательного режима содержит три характерные точки: А, В, С и условно может быть подразделен на два участка: АВ и ВС (рис. 2.4, в).

Точка А соответствует номинальному моменту двигателя и определяется по формуле

$$M_{ном} = \frac{P_{2ном} \cdot 9,55}{n_{2ном}} \quad (2.27)$$

Этому моменту соответствует номинальное скольжение, которое для двигателей общепромышленного применения имеет величину в пределах от 1 до 7%, т. е. $s_n = 1 - 7\%$. При этом мелкие двигатели имеют большее скольжение, а крупные — меньшее. Двигатели с повышенным скольжением, предназначенные для работы с ударной нагрузкой, имеют $s_n \sim 15\%$. К ним относятся, например, двигатели единой серии АС.

Точка С на характеристике соответствует величине начального вращающего момента, возникающего на валу двигателя при пуске. Этот момент M_p носит название начального, или пускового. Скольжение при этом равно единице, а скорость — нулю. Величина пускового момента при постоянных величинах напряжения и частоты тока зависит от активного сопротивления в цепи ротора. При этом вначале с возрастанием активного сопротивления увеличивается величина пускового момента, достигая своего максимума при равенстве активного сопротивления цепи ротора и полного индуктивного сопротивления двигателя. В дальнейшем с возрастанием активного сопротивления ротора величина пускового момента уменьшается, стремясь в пределе к нулю.

Точка В (рис. 2.4,б и в) соответствует максимальному моменту, который может развивать двигатель на всем диапазоне скоростей от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_0$. Этот момент носит название критического момента M_k . Критическому моменту соответствует и критическое скольжение S_k . Чем меньше величина критического скольжения S_k , а также величина номинального скольжения S_n , тем больше жесткость механической характеристики.

Следует иметь в виду, что величина критического момента не зависит от активного сопротивления роторной цепи, в то время как критическое скольжение S_k прямо пропорционально этому сопротивлению. Это означает, что с увеличением активного сопротивления роторной цепи величина критического момента остается неизменной, однако максимум кривой момента смещается в сторону возрастающих значений скольжения (рис. 2.4, г).

Величина критического момента прямо пропорциональна квадрату напряжения, подводимого к статору, и обратно пропорциональна квадрату частоты напряжений и частоты тока в статоре. Если, например, напряжение, подводимое к двигателю, будет равно 85% номинального значения, то величина критического момента при этом составит $0,85^2 = 0,7225 = 72,25\%$ критического момента при номинальном напряжении.

Обратное явление наблюдается при изменении частоты. Если, например, к двигателю, предназначенному для работы с частотой тока $f = 60$ Гц, подвести ток частотой $f = 50$ Гц, то критический момент получит в $(60/50)^2 = 1,44$ раза большее значение, чем при своей формальной частоте (рис. 2.4, д).

Критический момент характеризует собой мгновенную перегрузочную способность двигателя, т. е. он показывает, какую мгновенную (на несколько секунд) перегрузку способен перенести двигатель без каких-либо вредных последствий.

Участок механической характеристики от нулевого до максимального (критического) значения (см. рис. 2.4, бив) носит название устойчивой части характеристики, а участок ВС (рис. 2.4, в) — неустойчивой части.

Объясняется такое деление тем, что на возрастающей части характеристики ОВ с увеличением скольжения, т. е. с уменьшением скорости, растет развиваемый двигателем момент. Это означает, что при увеличении нагрузки, т. е. при возрастании тормозного момента, уменьшается скорость вращения двигателя, а развиваемый им момент увеличивается. При снижении нагрузки, наоборот, скорость

возрастает, а момент уменьшается. При изменении нагрузки на всем диапазоне устойчивой части характеристики происходит изменение скорости вращения и момента двигателя.

Механическая характеристика при постоянных U и I и отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора называется *естественной* характеристикой (характеристика короткозамкнутого асинхронного двигателя с фазным ротором без добавочного сопротивления в цепи ротора). *Искусственными*, или *реостатными*, характеристиками называются такие, которые соответствуют добавочному сопротивлению в цепи ротора.

Все значения пусковых моментов различны между собой и зависят от активного сопротивления цепи ротора. Одному и тому же номинальному моменту M_n соответствуют скольжения различной величины. С увеличением сопротивления цепи ротора возрастает скольжение и, следовательно, уменьшается скорость вращения двигателя. Благодаря включению в цепь ротора активного сопротивления механическая характеристика в устойчивой части вытягивается в сторону возрастания скольжения, пропорционально сопротивлению. Это означает, что скорость двигателя начинает сильно меняться в зависимости от нагрузки на валу и характеристика из жесткой делается мягкой.

Для определения критической частоты вращения ротора $n_{2кр} = n_1 \cdot (1 - S_{кр})$, необходимо знать критическое скольжение двигателя $S_{кр}$, которое соответствует максимальному значению момента M_{max} . Для определения $S_{кр}$ используем формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (2.28)$$

и номинальный режим работы двигателя, при котором номинальному значению скольжения соответствует номинальное значение вращающего момента

$$M_{ном} = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{ном}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{ном}}} \quad (2.29)$$

Принимая во внимание, что перегрузочная способность по вращающему моменту $\lambda_M = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$, из предыдущей формулы получим

$$\frac{s_{ном}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{ном}} = 2\lambda_M, \quad (2.30)$$

откуда получим квадратное уравнение

$$s_{кр}^2 - 2\lambda_M s_{ном} s_{кр} + s_{ном}^2 = 0. \quad (2.31)$$

Решение этого уравнения позволяет получить формулу для критического скольжения

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \quad (2.32)$$

$$n_{2кр} = n_1 \cdot (1 - S_{кр}) \quad (2.33)$$

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} \quad (2.34)$$

Сумма всех потерь в двигателе

$$\Delta P = P_{1ном} - P_{2ном} \quad (2.35)$$

При заданном напряжении сети $U_c=380В$ фазы обмотки статора соединяются звездой. При этом линейный и фазный ток одинаковые.

$$I_{л ном} = I_{ф ном} = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{1ном}} \quad (2.36)$$

Пусковые токи

$$I_{л пуск} = I_{ф пуск} = \lambda_I \cdot I_{л ном} \quad (2.37)$$

Номинальный и максимальный вращающие моменты

$$M_{ном} = \frac{P_{2ном} \cdot 9,55}{n_{2ном}} \quad (2.38)$$

$$M_{max} = \lambda_M \cdot M_{ном} \quad (2.39)$$

Для практических расчетов зависимость $M(S)$ при $U_c=const$ определяется формулой Клосса:

$$M1 = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}$$

Теперь, задаваясь значениями S от 0 до 1, необходимо определить значения вращающего момента по формуле Клосса. При этом заметим,

что на части зависимости $M(S)$, которая соответствует устойчивым режимам работы двигателя ($0 \leq S \leq S_{кр}$), достаточно иметь четыре точки при

$$S=0; \quad S=S_{ном}; \quad S_{ном} \leq S \leq S_{кр}; \quad S=S_{кр}.$$

На участке зависимости $M(S)$ с неустойчивыми режимами работы двигателя ($S_{кр} < S \leq 1$) можно задаться такими значениями скольжения S : 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1.

Результаты расчета сведем в таблицу 3.

Таблица 2.1. Данные для расчета естественной механической характеристики

S	0	$S_{ном}$	0,1	$S_{кр}$	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
M, Н · м									

Пусковой момент двигателя $M_{пуск}$ определяется при $S=1$, тогда кратность этого момента

$$k_{пуск} = \frac{M_{пуск}}{M_{ном}} \quad (2.40)$$

Для получения искусственных характеристик используют те же формулы, но следует учитывать все необходимые значения скольжений при сведении данных для построения в одну таблицу.

2.4. Автоматическое управление многоскоростным асинхронным двигателем

Далее рассматривается ступенчатый пуск, торможение (рекуперативное, противовключением и динамическое) и реверс многоскоростного асинхронного двигателя.

В схемах рассматривается четырехскоростной асинхронный двигатель типа AQ1-12/8/6/4, с техническими данными: $U_n = 220\text{В}$; $I_n = 9,1/10, 7/10, 3/11, 9\text{А}$; $n_n = 460/705/940/1440$ об/мин.

На статоре двигателя находятся две независимые обмотки, одна из которых обеспечивает синхронные частоты вращения двигателя 500/1000 об/мин (12/6 полюсов), а вторая - 750/1500 об/мин (8/4 полюсов). При включении соответствующей обмотки в треугольник (рис.1.2, а) получается меньшая синхронная скорость, а при включении в двойную звезду (рис. 1.2, б) — большая синхронная скорость.

В качестве аппаратуры управления используются контакторы и реле переменного тока с напряжением катушек 127В. Предусмотрены два источника напряжения: переменного тока 127В и постоянного тока 110В.

Напряжение переменного тока 127В подается на статор двигателя и схему управления с помощью выключателя QF1 (рис. 2.5). Напряжение постоянного тока 110 В подается на две фазы статора двигателя с помощью выключателя QF2.

Ступенчатый пуск может осуществляться с выдержкой времени на промежуточных скоростях с помощью реле времени.

Рекуперативное торможение осуществляется во время переключения двигателя с высоких скоростей на низкие, торможение противовключением осуществляется сменой направления вращения магнитного поля статора двигателя, динамическое торможение осуществляется при подключении обмотки статора двигателя к источнику постоянного тока. Ток динамического торможения равен 5А. Управление динамическим торможением и торможением противовключением может быть осуществлено по принципу времени.

2.4.1 Реверсивная схема управления двухскоростным двигателем, который осуществляет пуск на какую-либо из двух скоростей и динамическое торможение по принципу времени

В начальном положении выключатели QF1 и QF2 (рис. 2.5) замкнуты и не включен ни один из аппаратов. Для пуска двигателя предварительно нажимают или кнопку SB3 (меньшая скорость), или кнопку SB4 (большая скорость). При нажатии кнопки SB3, включается контактор K1, который обеспечивает своими главными контактами соединение обмотки статора в треугольник. При нажатии кнопки SB4, включатся контакторы K2 и K3, которые обеспечивают соединение обмотки статора в двойную звезду. Контакторы K1, K2 и K3 своими блок-контактами включают реле KM, которое необходимо для включения контакторов K1, K2 и K3 раньше контактора KB или КН. После этого нажимают кнопку SB1 (вперед) или SB2 (назад), что приводит к включению контактора KB или КН, который своими главными контактами подает напряжение на статор двигателя и обеспечивает его пуск.

После нажатия на кнопку SB5 (стоп) отключаются контакторы KB или КН, K1 (K2 и K3) и включается контактор K4, который своими главными контактами подает постоянный ток на две фазы статора. В результате этого начинается динамическое торможение двигателя. Одновременно с контактором K4 получает питание реле торможения КТ, которое, включившись, отсчитывает время торможения и своим контактом 37-39 отключает контактор K4.

Во время работы схема позволяет выполнять переходы с меньшей скорости на большую и наоборот без отключения контакторов KB или КН.

При нажатии на кнопку SB2 или на кнопку SB1 отключается соответственно контактор KB или КН и включается контактор КН или KB, что приводит к переходу двигателя в режим торможения противовключением и дальнейшего разгона его в противоположном направлении до установленной скорости.

В схеме имеет место блокировка размыкающими контактами KB, КН и K1, K3, которые предотвращают одновременное включение контакторов KB и КН, а также одновременное включение контакторов K1 и K3 (K2).

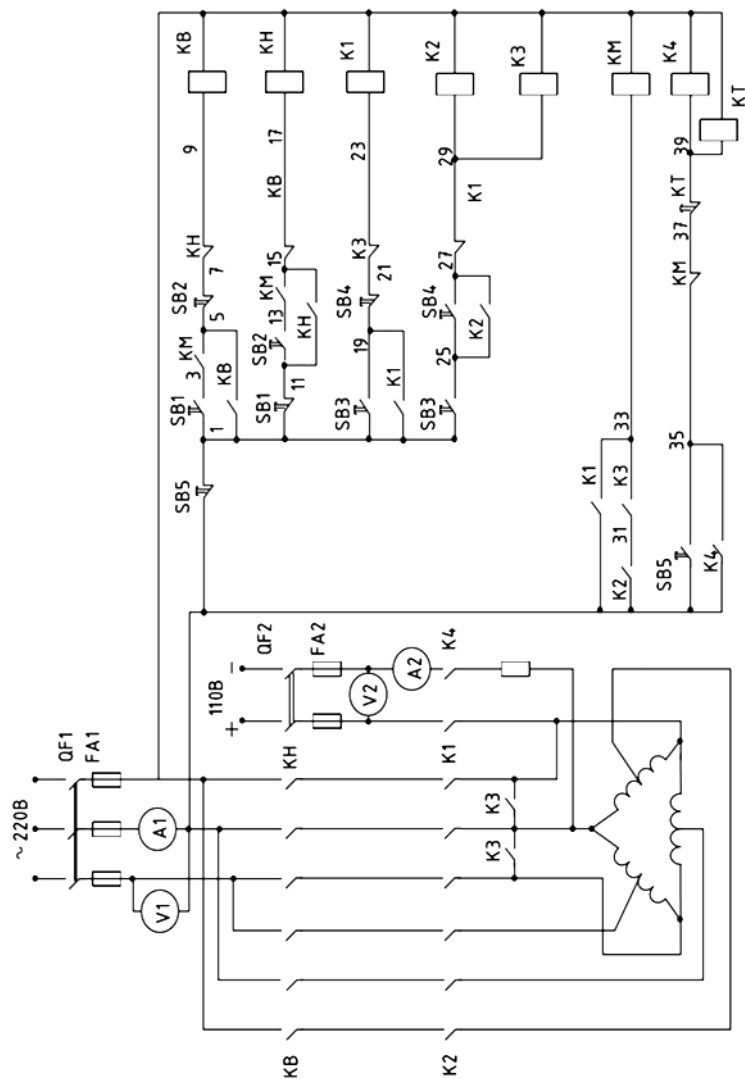


Рис. 2.5 Реверсивная схема управления двухскоростным двигателем

2.4.2 Реверсивная схема управления трехскоростным двигателем, которая осуществляет двухступенчатый пуск с выдержкой на промежуточной скорости, реверс с торможением противовключением, остановку с рекуперативным торможением до меньшей скорости и динамическое торможение до полной остановки с управлением по принципу скорости.

В начальном положении выключатели QF1 и QF2 (рис.2.6) замкнуты и ни один из аппаратов не срабатывает. Для пуска двигателя, например, в условном направлении «Вперед» нажимается кнопка SB1, которая включает реле KM1. Реле KM1 своим контактом 1-13 включает контактор промежуточной скорости K2, а также реле КУ и КТ1, а контактом 25-27 подготавливает цепь катушки контактора KB. Контактор K2 своими главными контактами обеспечивает соединение первой обмотки статора в треугольник. Реле КТ1 контактом 2-4 включает контактор KB и подготавливает цепь контактора меньшей скорости K3 и реле торможения КТ2. Контактор KB своими главными контактами подключает обмотку статора к сети. Происходит разгон двигателя до промежуточной скорости, равной 750 об/мин, с которой двигатель работает на протяжении времени, отсчитываемом реле КУ. Реле КУ, отсчитав время, своим контактом 15-17 отключает контактор K2, а контактом 15-21 включает контактор K1, которые своими главными контактами обеспечивают соединение первой обмотки статора двигателя в двойную звезду. Двигатель переходит на более высокую частоту вращения, равную 1500 об/мин.

Для осуществления реверса нажимается кнопка SB2, которая выключает реле KM1 и включает реле KM2. При выключении реле KM1 отключаются реле KB и КТ1, а также контактор K1. При включении реле KM2 отключается контактор KB, включаются реле КУ, КТ1 и контакторы K2 и КН. Осуществляется торможение противовключением и разгон двигателя до промежуточной скорости. После отсчета выдержки времени реле КУ отключает контактор K2 и включает контактор K1. Двигатель переходит на большую скорость.

Для остановки двигателя нажимается кнопка SB3. При этом отключается реле KM1 (или KM2), которое контактом 1-13 выключает реле КУ и КТ1, а также контактор K1, а контактом 1-39

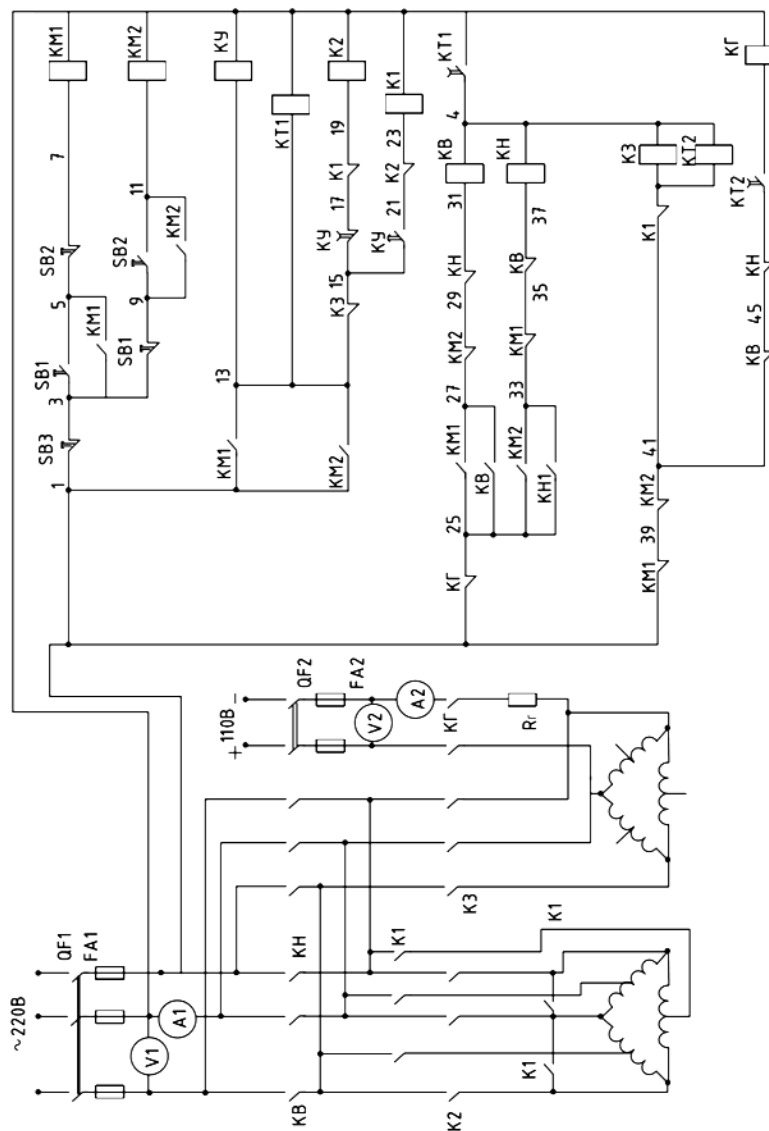


Рис. 2.6 Реверсивная схема управления трехскоростным двигателем

(или 39–41) включает контактор КЗ и реле торможения КТ2. Контактор КЗ своими главными контактами включает вторую обмотку статора в треугольник. Осуществляется рекуперативное торможение двигателя до частоты вращения, равной - 500 об/мин. Реле КТ2, включившись, своим контактом 47-49 подготавливает цепь контактора динамического торможения КГ.

Реле торможения КТ1, отсчитав время рекуперативного торможения, отключает контактом 2-4 контакторы КВ (или КН), КЗ и реле КТ2. Оно включает контактор КГ, который своими главными контактами подключает вторую обмотку статора к сети постоянного тока. Осуществляется динамическое торможение. Реле торможения КТ2 отсчитывает время торможения и контактом 47-49 выключает контактор КГ. Двигатель останавливается.

Схема управления возвращается в начальное положение и готова к следующему пуску двигателя.

В схеме предусмотрены блокировки размыкающими контактами К1, К2, КЗ та КВ, КН, КГ, которые предотвращают одновременное включение контакторов К1, К2, КЗ и КВ, КН, КГ.

3. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ РГЗ

3.1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (Задание 1).

Исходные данные: $P_{2\text{ном}}=90\text{кВт}$; $U_{\text{ном}}=220\text{В}$; $n_{\text{ном}}=1060\text{об/мин}$;
 $\eta_{\text{ном}}=0,892$; $R_{\text{я}}=0,03\text{Ом}$; $R_{\text{ов}}=25,6\text{Ом}$.

1.1. Для номинального режима работы определить ток $I_{\text{ном}}$; ток возбуждения $I_{\text{в.ном}}$; суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P_{\text{ном}}$; электромагнитную мощность $P_{\text{эмном}}$; электродвигательную силу (ЭДС) $E_{\text{ном}}$.

Мощность и ток, потребляемые двигателем из сети

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{90}{0,892} = 100,9 \text{ кВт}; \quad (3.1)$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{100,9 \cdot 10^3}{220} = 458,6 \text{ А}. \quad (3.2)$$

Ток обмотки возбуждения и ток якоря

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{25,6} = 8,6 \text{ А}; \quad (3.3)$$

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в.ном}} = 458,6 - 8,6 = 450 \text{ А}. \quad (3.4)$$

Суммарные потери мощности в двигателе

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 100,9 - 90 = 10,9 \text{ кВт}. \quad (3.5)$$

ЭДС якоря

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 450 \cdot 0,03 = 206,5 \text{ В}. \quad (3.6)$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эмном}} = E_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я.ном}} = 206,5 \cdot 450 = 92925 \text{ Вт}. \quad (3.7)$$

Вращающий электромагнитный и полезный моменты

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{эмном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{92925}{1060} = 837,2 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (3.8)$$

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{90000}{1060} = 810,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.9)$$

1.2. Определить частоту вращения якоря n_0 в режиме идеального холостого хода.

Базовая формула механической характеристики

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot R_{\text{я}} = n_0 - CM R_{\text{я}}. \quad (3.10)$$

Частота вращения при холостом ходе ($M=0$)

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} = 1060 \cdot \frac{220}{206,5} = 1129 \text{ об./мин.} \quad (3.11)$$

Постоянная двигателя

$$C = \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} = \frac{450 \cdot 1060}{206,5 \cdot 837,2} = 2,76 \frac{\text{об.}}{\text{мин} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}}. \quad (3.12)$$

1.3. Построить естественную механическую характеристику $n(M)$, где n , M – частота вращения и вращающий момент якоря.

Естественная механическая характеристика является прямой линией, которая может быть построена по двум точкам: точке А с координатами ($M=0$; $n=n_0=1129$ об/мин) и точке В с координатами ($M=M_{\text{ном}}=837,2\text{Нм}$; $n=n_{\text{ном}}=1060$ об/мин)

1.4. Аналитически или графически, используя построенную в п.1.3 характеристику $n(M)$, определить частоту вращения якоря при вращающем моменте $M = 0,6 M_{\text{ном}}$.

$$n = n_0 - C \cdot 0,6 M_{\text{ном}} R_{\text{я}} = 1129 - 2,76 \cdot 0,6 \cdot 837,2 \cdot 0,03 = 1087 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \quad (3.13)$$

1.5. Построить искусственную механическую характеристику $n(M)$ при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$, если в цепь якоря ввести регулировочный реостат с сопротивлением $R_p = 2,5 R_{\text{я}}$ (рис.3.1).

Искусственная механическая характеристика при включении регулировочного реостата с сопротивлением $R_p = 2,5 R_{\text{я}}$ и при сохранении $U = U_{\text{ном}}$ определяется по базовой формуле

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я.ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot (R_{\text{я}} + R_p) = n_0 - CM (R_{\text{я}} + R_p), \quad (3.14)$$

где частота вращения якоря при холостом ходе n_0 и постоянная двигателя C сохраняются такими же как и для естественной механической характеристики.

Искусственная механическая характеристика также является прямой линией, которая также строится по двум точкам.

Точка А с координатами ($M=0$; $n=n_0=1129$ об/мин).

Для второй точки С при номинальном моменте $M=M_{\text{ном}}=837,2\text{Нм}$ рассчитаем частоту вращения

$$n = n_0 - CM(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) = 1129 - 2,76 \cdot 837,2(0,03 + 2,5 \cdot 0,03) = 886,38 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \quad (3.15)$$

1.6. Определить сопротивление $R_{\text{р}}$ регулировочного реостата, который нужно включить в цепь якоря (рис. 2) для ограничения пускового тока якоря до $I_{\text{я пуск}}=2,4I_{\text{я ном}}$, если двигатель включается при пуске на номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$.

Сопротивление регулировочного реостата при $U_{\text{ном}}$ определяется по формуле для тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{р}}} = 2,4I_{\text{я.ном}} \quad (3.16)$$

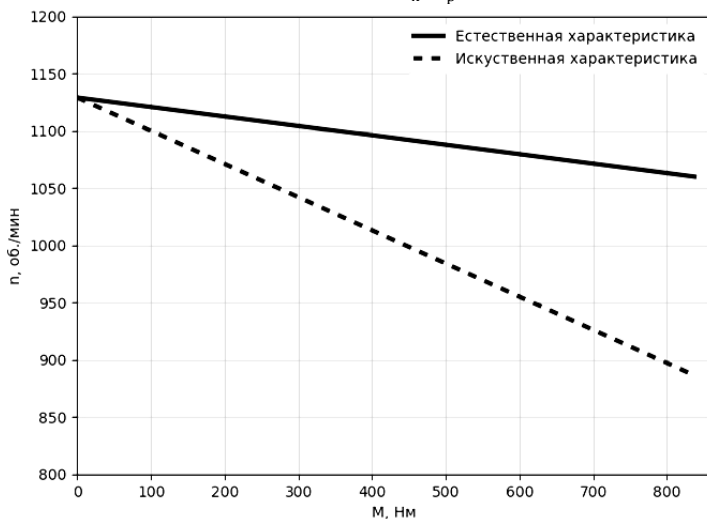


Рис.3.1 Механические характеристики ДПТ

После преобразования

$$R_{\text{р}} = \frac{U_{\text{ном}}}{2,4I_{\text{я.ном}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2,4 \cdot 450} - 0,03 = 0,2 \text{ Ом} \quad (3.17)$$

1.7. Найти величину напряжения питания при пуске $U_{\text{пуск}}$, до которой его надо снизить при включении двигателя, чтобы пусковой ток якоря $I_{\text{я пуск}}$ не превысил бы $I_{\text{я пуск}}=2,3I_{\text{я ном}}$ без включения дополнительных сопротивлений.

Напряжение питания $U_{\text{пуск}}$ при $R_p=0$ для $I_{\text{я пуск}}=2,3I_{\text{я ном}}$ определяется из формулы для тока якоря

$$U_{\text{пуск}} = 2,3 \cdot I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}} = 2,3 \cdot 450 \cdot 0,03 = 31,05 \text{ В} \quad (3.18)$$

3.2. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя (Задание 3)

Исходные данные: $U_{\text{ф}}/U_{\text{л}}=220/380\text{В}$; схема - Y; $P_{2\text{ном}} = 5.5 \text{ кВт}$;

$$f = 50 \text{ Гц}; p = 6; S_{\text{ном}} = 0,05; \lambda_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 1,8;$$

$$\lambda_I = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ном}}} = 6; \eta_{\text{ном}} = 0,830; \cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,740;$$

3.1. Выбрать линейное напряжение питающей трехфазной сети $U_{\text{с}}$.

При соединении обмоток статора звездой $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$, где $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$ – соответственно линейное и фазное напряжение обмотки статора. Поэтому линейное напряжение сети

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} = 380 \text{ В} \quad (3.19)$$

3.2. Определить синхронную частоту вращения поля статора n_1 , номинальную $n_{2\text{ном}}$ и критическую $n_{2\text{кр}}$ частоту вращения ротора.

Синхронная частота вращения поля статора n_1

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/мин} \quad (3.20)$$

Номинальная частота вращения ротора

$$n_{2\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - S_{\text{ном}}) = 500 \cdot (1 - 0,05) = 475 \text{ об/мин} \quad (3.21)$$

Для определения критической частоты вращения ротора

$n_{2\text{кр}} = n_1 \cdot (1 - S_{\text{кр}})$, необходимо знать критическое скольжение двигателя $S_{\text{кр}}$, которое соответствует максимальному значению момента M_{max} . Для определения $S_{\text{кр}}$ используем формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S}} \quad (3.22)$$

и номинальный режим работы двигателя, при котором номинальному значению скольжения соответствует номинальное значение вращающего момента

$$M_{\text{ном}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{ном}}}} \quad (3.23)$$

Принимая во внимание, что перегрузочная способность по вращающему моменту $\lambda_M = \frac{M_{maxMAX}}{M_{ном}}$, из предыдущей формулы получим

$$\frac{S_{ном}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_{ном}} = 2\lambda_M, \quad (3.24)$$

откуда получим квадратное уравнение

$$S_{кр}^2 - 2\lambda_M S_{ном} S_{кр} + S_{ном}^2 = 0. \quad (3.25)$$

Решение этого уравнения позволяет получить формулу для критического скольжения

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0,05 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,165 \quad (3.26)$$

$$n_{2кр} = n_1 \cdot (1 - S_{кр}) = 500 \cdot (1 - 0,165) = 417,5 \text{ об/мин} \quad (3.27)$$

3.3. Определить мощность $P_{1ном}$, которую двигатель потребляет из сети, и суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P_{ном}$ в номинальном режиме; номинальный $I_{ном}$ и пусковой $I_{пуск}$ токи двигателя, его номинальный $M_{ном}$ и максимальный M_{max} вращающие моменты.

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{5,5}{0,83} = 6,62 \text{ кВт}. \quad (3.28)$$

Сумма всех потерь в двигателе

$$\Delta P = P_{1ном} - P_{2ном} = 6,62 - 5,5 = 1,12 \text{ кВт} \quad (3.29)$$

При заданном напряжении сети $U_c=380\text{В}$ фазы обмотки статора соединяются звездой. При этом линейный и фазный ток одинаковые.

$$I_{л ном} = I_{ф ном} = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{1ном}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,83 \cdot 0,74} = 13,6 \text{ А} \quad (3.30)$$

Пусковые токи

$$I_{л пуск} = I_{ф пуск} = \lambda_I \cdot I_{л ном} = 6 \cdot 13,6 = 81,6 \text{ А} \quad (3.31)$$

Номинальный и максимальный вращающие моменты

$$M_{ном} = \frac{P_{2ном} \cdot 9,55}{n_{2ном}} = \frac{5,5 \cdot 10^3 \cdot 9,55}{475} = 110,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.32)$$

$$M_{max} = \lambda_M \cdot M_{ном} = 1,8 \cdot 110,6 = 199 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.33)$$

3.4. Рассчитать и построить график зависимости $M(S)$, где M – вращающий момент, S – скольжение ротора. По этой зависимости

определить пусковой вращающий момент двигателя $M_{\text{пуск}}$ и кратность этого момента $k_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$.

Для практических расчетов зависимость $M(S)$ при $U_c = \text{const}$ определяется формулой Клосса:

$$M1 = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S}} = \frac{2 \cdot 199}{\frac{S}{0,165} + \frac{0,165}{S}} = \frac{398}{\frac{S}{0,165} + \frac{0,165}{S}} \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.34)$$

Теперь, задавая значения S от 0 до 1, необходимо определить значения вращающего момента по формуле Клосса. При этом заметим, что на части зависимости $M(S)$, которая соответствует устойчивым режимам работы двигателя ($0 \leq S \leq S_{\text{кр}}$), достаточно иметь четыре точки при

$$S=0; \quad S=S_{\text{ном}}; \quad S_{\text{ном}} \leq S \leq S_{\text{кр}}; \quad S=S_{\text{кр}}. \quad (3.35)$$

На участке зависимости $M(S)$ с неустойчивыми режимами работы двигателя ($S_{\text{кр}} < S \leq 1$) можно задаться такими значениями скольжения S : 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1.

Результаты расчета сведем в таблицу 3.1.

Табл.3.1. Данные для расчета естественной механической характеристики

S	0	$S_{\text{ном}}=0,05$	0,1	$S_{\text{кр}}=0,165$	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
M, Н · м	0	110,5	176	199	168	140	102	79	64

Пусковой момент двигателя определяется при $S=1$ и равен

$$M_{\text{пуск}} = 64 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.36)$$

тогда кратность этого момента

$$k_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{64}{110,5} = 0,58 \quad (3.37)$$

3.5. Рассчитать и построить в одной координатной системе три механических характеристики – зависимости $n_2(M)$, где n_2 - частота вращения ротора:

а) естественную механическую характеристику при заданном напряжении сети U_c (как в п.3.4.), а также определить по ней диапазон частот вращения ротора, при которых возможна устойчивая работа двигателя;

б) искусственную механическую характеристику при снижении напряжения питающей сети на 15%, то есть при $U = 0,85U_c$;

в) искусственную механическую характеристику при условии, что суммарное активное сопротивление в каждой фазе обмотки ротора стало в 2,2 раза большим, чем у двигателя, для которого рассчитаны предыдущие характеристики, то есть $R'_2 = 2,2R_2$ (это возможно, если бы данный двигатель был двигателем с фазным ротором (рис.5), и тогда бы в фазы обмотки ротора можно было бы включить регулировочные реостаты с сопротивлениями $R_p = 1,2R_2$); при этом индуктивное сопротивление фаз обмотки ротора X_{20} не меняется; напряжение сети считать равным U_c .

а) Данные для построения характеристики берем из пункта 3.4. с учетом того, что появится еще одно значение скольжения (соответствующее $S_{кр}$ для третьей искусственной характеристики). Частоту вращения считаем по формуле

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - S) = 500 \cdot (1 - S) \quad (3.38)$$

б) Чтобы получить искусственную характеристику при снижении напряжения питающей сети на 15%, т.е. $U = 0,85U_c$, воспользуемся теми же формулами, что и для естественной механической характеристики в предыдущем пункте. Но при этом следует учитывать то, что максимальный вращающий момент изменяется в зависимости от напряжения следующим образом

$$M'_{max} = \left(\frac{U}{U_c}\right)^2 M_{max} = (0,85)^2 \cdot 199 = 143,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.39)$$

То есть искусственную характеристику для этих условий строим по тем же значениям скольжений и частот вращения n_2 , рассчитывая вращающий момент по формуле

$$M_2 = \frac{2 \cdot M'_{max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} = \frac{2 \cdot 143,8}{\frac{S}{0,165} + \frac{0,165}{S}} = \frac{287,6}{\frac{S}{0,165} + \frac{0,165}{S}} \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.40)$$

(как известно, значение $S_{кр}$ не зависит от напряжения питания). Эта и естественная механические характеристики получены при условии, что фазы обмотки ротора имеют только свое активное сопротивление R_2 , то есть нет никаких дополнительных сопротивлений ($R_p = 0$).

в) Чтобы получить искусственную характеристику при введении в фазы обмотки ротора регулировочных реостатов с сопротивлениями $R_p = 1,2R_2$, воспользуемся теми же формулами, что и для естественной механической характеристики ранее. Но при этом надо учитывать, что

теперь изменится критическое скольжение, которое определяется по известной формуле

$$S_{кр} = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (3.41)$$

Поэтому при добавлении к R_2 еще регулировочного реостата с сопротивлением $R_p=1,2R_2$ и сохранением индуктивного сопротивления фазы обмотки статора X_{20} , составим пропорцию и получим новое значение критического скольжения для искомой искусственной механической характеристики

$$S'_{кр} = \frac{R_2 + R_p}{R_2} \cdot S_{кр} = \frac{R_2 + 1,2R_2}{R_2} \cdot S_{кр} = 2,2 \cdot S_{кр} = 2 \cdot 0,165 = 0,363 \quad (3.42)$$

Максимальный вращающий момент M_{max} не зависит от $R_{п1}R_2$ и остается таким же, как и для естественной механической характеристики. Заметим, что эта искусственная механическая характеристика рассчитывается при напряжении питания $U = U_c$.

Таким образом, искусственную механическую характеристику при определенных условиях ($R_p=1,2R_2$, $U = U_c$) строим для тех же значений скольжений S и частоты вращения n_2 , что и в предыдущих случаях, рассчитывая вращающий момент по формуле

$$M3 = \frac{\frac{2 \cdot M_{max}}{S} \cdot \frac{S'_{кр}}{S}}{\frac{S'_{кр}}{S} + \frac{S}{S}} = \frac{\frac{2 \cdot 199}{S} \cdot \frac{0,363}{S}}{\frac{0,363}{S} + \frac{S}{S}} = \frac{398}{\frac{0,363}{S} + \frac{S}{S}} \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.43)$$

Результаты расчетов сведем в общую таблицу 4.

Табл.3.2. Данные для расчета механических характеристик АД

S	0	0,05	0,1	0,165	0,3	0,363	0,4	0,6	0,8	1,0
n_2 , об/мин	500	475	450	417,5	350	318,5	300	200	100	0
M1, Нм	0	110,5	176	199	168	150	140	102	79	64
M2, Нм	0	79,8	127,5	143,8	121,3	108,1	101,6	73,7	57	46,2
M3, Нм	0	53,8	109,6	150	195	199	199	176,9	150,2	128

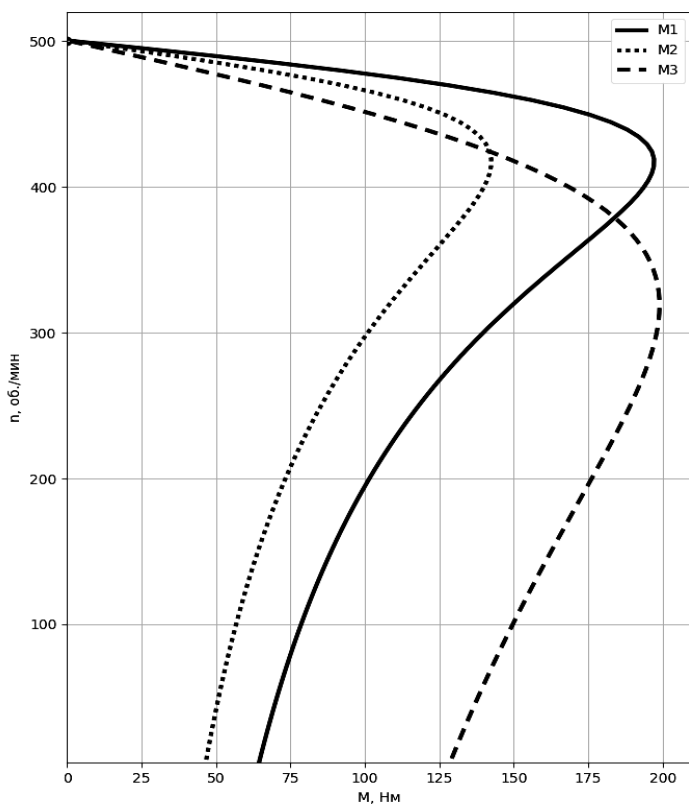


Рис.3.2. Результаты построения механических характеристик АД.

Библиографический список

1. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений /В.В. Москаленко.– М.: Издательский центр “Академия”, 2007. – 368 с.
2. Справочник по электрическим машинам: в 2 т.; под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 688 с
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное.– М.: Энергия, 1977 – 432 с.
4. Гребенников В.И. Электропривод: уч. пособие к курсовому проектированию / В.И.Гребенников. –Юж. – Рос. Гос. техн. ун – т. – Новочеркасск: ЮРГТУ,2009. – 520 с
5. Качин С.И. Электрический привод: учебно-методическое пособие / С.И.Качин, А.Ю.Чернышев, О.С. Качин; Томский политехнический университет.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
6. Дементьев Ю.Н. Электрический привод: учебное пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю.Чернышев, И.А.Чернышев.– Томск: Изд-во ТПУ, 2010 – 232 с
7. Никитенко Г.В. Электрический привод производственных механизмов: учебное пособие. / Г.В.Никитенко. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.:Изд - во “Лань”, 2013. – 224 с.
8. Михайлов О.П. Автоматизированный привод станков и промышленных роботов/ Уч. для ВУЗов. — М.: Машиностроение, 1990.
9. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. – М.: Энергия, 1971.
- 10.Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высшая школа, 1979.
- 11.Игнатов В.А. Электрооборудование современных металлорежущих станков и обрабатывающих комплексов. – М.: Высшая школа, 1991

Оглавление

Общие положения.....	3
1.Формулировка заданий.....	4
1.1 Задание 1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	4
1.2 Задание 2. Составить схему пуска и торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.....	6
1.3 Задание 3. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя	7
1.4 Задание 4. Составить схему пуска и торможения асинхронного двигателя.....	10
2. Теоретические сведения.....	11
2.1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	11
2.2. Автоматическое управление двигателем постоянного тока независимого возбуждения.....	15
2.3. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя	21
2.4. Автоматическое управление многоскоростным асинхронным двигателем.....	28
3. Примеры выполнения расчетной части РГЗ.....	34
3.1. Параметры и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (Задание 1).....	34
3.2. Параметры и характеристики трехфазного асинхронного двигателя (Задание 3).....	37
Библиографический список.....	43

Учебное издание

Приходько Ольга Юрьевна
Корнилова Надежда Андреевна
Фролов Вячеслав Викторович

Основы электропривода

*Методические рекомендации к выполнению расчетно-графического задания
для студентов направления бакалавриата 13.03.02 - Электроэнергетика и
электротехника, специальности 15.05.01 – Проектирование технологических
машин и комплексов*

Подписано в печать __. __. __. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. __. Уч.-изд. л. __.
Тираж __ экз. Заказ ____. Цена ____.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В. Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46