

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный лесотехнический университет
им. Г.Ф. Морозова»

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Методические указания
к выполнению курсового проекта для студентов
по направлению подготовки
15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств

Воронеж, 2016

УДК 658.5.011.56

Поляков, С. И. Электропривод и электромеханические системы [Текст]: метод. указания к выполнению курсового проекта для студентов по направлению подготовки 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств / С. И. Поляков; Мин-во обр-я и науки Рос. Фед., ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016. – 52 с.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

Рецензент: профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств Воронежского государственного архитектурно-строительного университета В.И. Акимов

ВВЕДЕНИЕ

Цель преподавания дисциплины – сформировать у студентов необходимые теоретические и практические навыки в решении задач электротехнического цикла, определяющих профессиональное значение бакалавра по направлению подготовки 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств.

Задача изучения дисциплины – освоение студентами знаний об общих принципах функционирования электропривода и электромеханических систем, механических характеристиках электропривода, устройстве и принципе действия машин переменного и постоянного токов, регулирования скорости электроприводов, систем замкнутого и разомкнутого управления электроприводами.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- общие вопросы теории электрических машин постоянного тока, трансформаторов, асинхронных и синхронных машин;
- устройство, принцип действия и характеристики общепромышленных электрических машин постоянного и переменного тока;
- устройство, принцип действия и характеристики микромашин постоянного и переменного тока, применяемых в системах автоматического управления и робототехнических средствах автоматизации;

уметь:

- выполнить проектно-конструкторские и расчетные работы по созданию и внедрению средств и систем автоматизации с применением общепромышленных и специальных электрических машин;
- обеспечивать их монтаж, наладку и техническое обеспечение;
- составлять технические задания на разработку названных средств с применением электрических машин, анализировать режимы эксплуатации электрических машин, применяемых в автоматизации технологических процессов, формулировать требования, предъявляемые к действующим и проектируемым механизмам, в которых используются электрические машины, проводить научные исследования и эксперименты систем автоматизации с использованием электрических машин, разрабатывать и вести техническую документацию.

При курсовом проектировании студент должен закрепить знания по изучаемой дисциплине. Тема курсового проекта данной дисциплины согласовывается с темой проекта по дисциплине "Автоматизация технологических процессов и производств" для одного и того же объекта автоматизации.

Задача методических указаний заключается в изложении требований по выполнению и оформлению курсового проекта, а также выполнения отдельных разделов с применением компьютерной техники.

1 Общие сведения

Выполнение курсового проекта является заключительным этапом обучения студентов по дисциплине "Электропривод и электромеханические системы", достижение цели которого замечается в систематизации, закреплении и расширении теоретических знаний и практических навыков при решении конкретных задач на современном научно-техническом уровне.

В процессе выполнения курсового проекта решаются основные задачи формирования будущего бакалавра: умение составлять технические задания на проектирование принципиальной схемы управления и расчет механических характеристик электродвигателей независимого и параллельного возбуждения, расчет пусковых сопротивлений электродвигателей независимого и параллельного возбуждения, расчет механических характеристик асинхронного двигателя, расчет пусковых и тормозных резисторов асинхронных электродвигателей, переходные режимы при нелинейной совместной характеристике, выбор мощности электродвигателя для продолжительного режима работы; выполнять проектно-расчетные работы на стадии технического проектирования; обучение передовым методам инженерного проектирования, методам ведения научно-исследовательской работы при конкретном проектировании. Выполнение курсового проекта должно базироваться на использовании комплексных систем стандартов в соответствии с Государственной системой стандартизации (ГСС).

2 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовой проект выполняется по двум основным разделам: текстовой (расчетной) части и графической работе.

Графическая часть работы (2 листа формата А1) включает принципиальную схему управления и иллюстрацию расчетной части в виде графиков механических характеристик и переходных процессов. Текстовая часть проекта (25-30 страниц текста) содержит описание объекта (технологического оборудования), принципиальной схемы управления, расчетную часть, примеры заказных спецификаций на средства управления и коммутации.

3 СОДЕРЖАНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

В графической части проекта студентом разрабатывается принципиальная схема управления объектом, агрегатом, механизмом, задвижкой или принципиальная схема автоматического управления исполнительными органами робота.

3.1 ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

Принципиальная схема управления должна отражать принцип действия, состав, основные характеристики и взаимодействие средств автоматики, пред-

назначенных для осуществления функций управления, регулирования, сигнализации, измерения, блокировки и защиты.

В отличие от схем автоматизации на принципиальных схемах приводится не только блочно–функциональный состав, но и развернутые схемы с указанием отдельных элементов и связи между ними.

Примечание: для сложных средств автоматизации развернутые схемы могут приводиться на отдельных чертежах. При этом на принципиальной схеме управления такие средства обозначаются прямоугольником или окружностью с указанием в нем номера чертежа развернутой схемы или заводского номера этого изделия.

3.2 Состав и компоновка чертежа схемы

Поскольку объект автоматизации может представлять собой совокупность нескольких технологических агрегатов, машин, линий, участков и т.п., то система автоматизации может состоять из совокупности нескольких относительно самостоятельных подсистем или контуров автоматизации. И принципиальная схема управления может состоять из нескольких отдельных гальванически несвязанных между собой принципиальных схем, изображенных на одном чертеже. А чертеж принципиальной схемы может быть выполнен на одном или нескольких листах под одним названием или индексом.

В состав чертежа схемы входят:

- основная надпись;
- выкопировки из технологической схемы или схемы автоматизации, поясняющие назначение и принцип действия схемы автоматики;
- схемы главных (силовых) цепей (обмотки электрических двигателей, катушки электромагнитов и цепи, по которой к ним подводится питание);
- схемы управления, сигнализации, блокировки и защиты;
- изображение сложной аппаратуры управления (контроллеров, микропроцессоров, микроЭВМ и т.п.);
- изображение контактов, занятых в других схемах (т.е. контактов тех релейных контактных аппаратов, катушки которых изображены на данной схеме, а сами контакты на других схемах). Иногда схемы сигнализации исполняются отдельно от схем управления;
- диаграммы переключения контактов конечных выключателей;
- таблицы замыкания контактов переключателей управления;
- перечень элементов схемы (спецификация) с указанием места их установки (по месту, на щите, на пульте и т.п.). Этот перечень может быть приведен на отдельных листах формата А4;
- таблица с поясняющими надписями;
- таблица применимости;
- примечание;

– таблица нестандартных обозначений.

3.3 Компоновка чертежа схемы

Схемы могут выполняться либо с вертикальным, либо с горизонтальным расположением цепей. При этом цепью называют совокупность последовательно соединенных элементов (контактов, обмоток, резисторов), расположенных на одной линии.

Пример компоновки чертежа с горизонтальным расположением цепей.

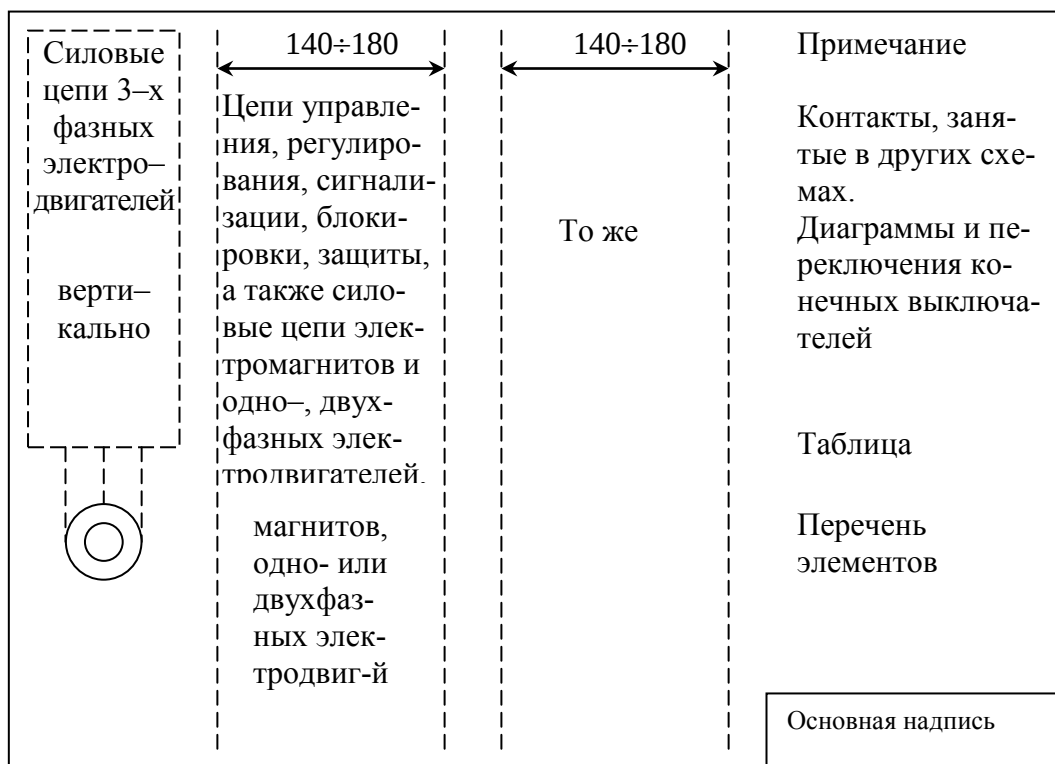


Рис. 1 Компоновка чертежа принципиальной схемы управления

Аппаратура, подлежащая обязательному показу на принципиальной схеме управления

- 1) обмотки электрических двигателей и электромагнитов, управление которыми осуществляется;
- 2) аппаратура ручного управления (кнопки, ключи, переключатели);
- 3) аппаратура или элементы аппаратуры автоматического управления и регулирования;
- 4) аппаратура автоматической защиты;
- 5) сигнальные аппараты, если не предусматривается отдельная схема сигнализации.

4 ОФОРМЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ НАДПИСИ

Форма и пример выполнения основной надписи на чертежах схем автоматизации вообще и функциональных схем в частности приведены на рис. 2. Эта форма несколько отличается от принятой в проектных организациях (указанием темы проекта и правилом построения обозначения документа).

В графе (1) указывают тему проекта.

В графе (2) - обозначение (шифр) документа. При этом первые две цифры обозначает год выполнения (защиты) проекта, следующие за годом цифры – номер приказа на дипломное проектирование; предпоследние две (три) цифры – номер темы проекта по приказу; последние две цифры – номер листа в данном проекте.

В графе (3) - наименование предприятия, в состав которого входит объект автоматизации.

В графе (4) - наименование объекта автоматизации (цеха, участка, линии, агрегата, технологического процесса и т.п.).

В графе (5) - наименование схемы.

В графе (6) - стадия проектирования; прячем буквы "ДП" означают "Дипломный проект", буквы "КП" - "Курсовой проект".

В графе (7) - порядковый номер данного листа в схеме с указанным наименованием.

В графе (8) указывает общее число листов данной схемы, а не всего проекта. В графе (9) - сокращённые наименования института и кафедры, на которой выполнен проект.

Заполнение остальных граф основной надписи в соответствии с рис. 2.

7	10	23	15	10	70	50			
					(1) Компьютерная система управления прессованием	(2) 05-304/02-15-07		15	
			Подпись	Дата	(3) ОАО Волгоградмебель			10	
Разраб.	Иванов				Цех древесностружечных плит. Участок прессования (4)	Стадия	Лист	Листов	
Консульт.	Петров					(6)	(7) 1	(8) 2	
Рук.проект.	Сидоров								
Нормокон.									
Зав. каф.					(5) Схема принципиальная управления	(9) ВГЛТА кафедра АПП			
								15	

Рис. 2 Форма и образец заполнения основной надписи

5 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

§ 4.2. Механические характеристики электродвигателей независимого и параллельного возбуждения

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения характеризуются тем, что их поток возбуждения постоянен и не зависит от нагрузки. Действительно, их обмотки возбуждения включены или к специальному возбудителю, или в сеть (рис. 4.1, а, б), а ток возбуждения не зависит от тока якоря.

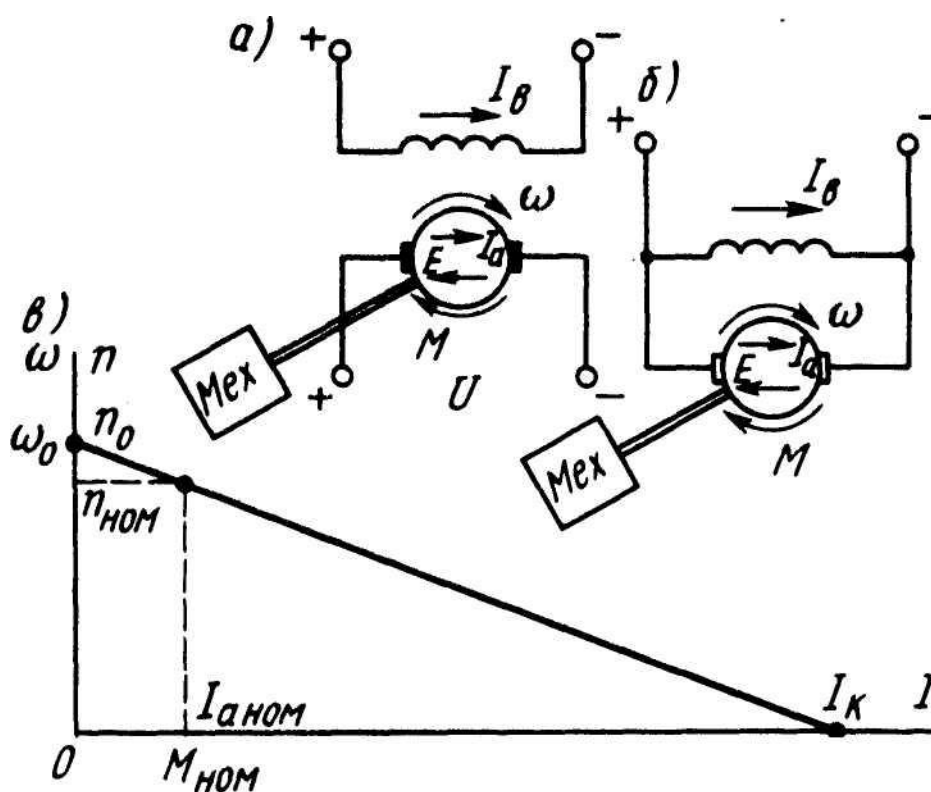


Рис. 4.1. Схемы двигателей постоянного тока независимого (а) и параллельного (б) возбуждения и их механическая (скоростная) характеристика (в)

В формуле (4.5) заменим силу тока в якоре выражением $I_a = M / (K\Phi)$, получим уравнение механической характеристики

$$\omega = U / (K\Phi) - MR_a / (K^2 \Phi^2)$$

или

$$n = U / (C_e \Phi) - M R_a / (C_e C_m \Phi^2).$$

Уравнение скоростной характеристики

$$\omega = U / (K \Phi) - I_a R_a / (K \Phi)$$

или

$$n = U / (C_e \Phi) - I_a R_a / (C_e \Phi).$$

Формулы (4.8.) - (4.9) представляют собой линейные зависимости скорости (частоты вращения) от момента (силы тока), так как n , ω , M и I_a входят в эти уравнения в первой степени, а остальные величины остаются неизменными при изменении нагрузки. Отношения

$$\omega_0 = U / (K_2 \Phi) \text{ и } n_0 = U / (C_e \Phi)$$

называют угловой скоростью и частотой вращения при идеальном холостом ходе. На рис. 4.1, в изображена механическая (она же и скоростная) характеристика, на которой можно отметить три характерные точки: холостого хода, номинальной нагрузки короткого замыкания.

Расчет механических характеристик электродвигателей независимо и параллельного возбуждения. Так как механическая характеристика прямолинейна, то для того, чтобы рассчитать и построить ее, достаточно найти координаты двух любых точек. Имея паспортные данные, целесообразно выбрать точки холостого хода номинального режима.

Точка холостого хода имеет координаты $\omega_0(n_0)$ и $M=0$

Скорость и частота вращения идеального холостого хода

$$\omega_0 = \omega_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}} R_a) = \omega_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / E_{\text{ном}}$$

$$n_0 = n_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}} R_a) = n_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / E_{\text{ном}}$$

Точка номинального режима имеет координаты $\omega_{\text{ном}}(n_{\text{ном}})$ и $M_{\text{ном}}$. При чем $n_{\text{ном}}$ задается в паспорте, а момент рассчитывается по формуле $M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}$ или $M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}$.

По таким формулам рассчитывают естественную характеристику, полу-

чаемую при включении двигателя на номинальное напряжение без добавочных резисторов в цепи якоря и возбуждения. Если же при номинальном моменте включить добавочный резистор в цепь якоря, то получим искусственную характеристику:

$$\omega = U / (K\Phi) - M(R_a + R_{доб}) / (K\Phi)^2$$

или

$$n = U / (C_e \Phi) - M(R_a + R_{доб}) / (C_e C_m \Phi^2).$$

Из уравнений следует, что скорость идеального холостого хода при включении резистора $R_{доб}$ не изменяется, а номинальная точка имеет другую ординату:

$$\omega'_{ном} = \omega_0 [U_{ном} - I_{аном}(R_a + R_{доб})] / U_{ном}$$

$$n'_{ном} = n_0 [U_{ном} - I_{аном}(R_a + R_{доб})] / U_{ном}$$

Чем больше $R_{доб}$, тем меньше жесткость характеристики.

Пример 4.1. Рассчитать и построить естественную и искусственную механические характеристики и определить их жесткость для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по следующим справочным данным:

Дано: $U_{ном} = 110\text{В}$, $P_{ном} = 4,5 \text{ кВт}$, $n_{ном} = 1000 \text{ об/мин}$,
 $n_{макс} = 2000 \text{ об/мин}$, $I_{ном} = 50,5\text{А}$, $J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $2p = 4$, $2a = 2$, $\omega_a = 186 \text{ витков}$,
 $R_{дв.х} = R_a + R_{доб.п} = 0,156 \text{ Ом}$, $R_{пос.х} = 0,0068 \text{ Ом}$; $\omega_{ш} \text{ (на полюс)} = 800 \text{ витков}$,
 $R_{ш.х} = 46 \text{ Ом}$, $R_{*доб} = 0,4$.

Буква «х» в индексе означает, что сопротивления даны для холодных обмоток (при 20°C).

Решение. 1. Сопротивления обмоток якоря и возбуждения в нагретом состоянии: $R_a = k_{нг} (R_{дв.х} + R_{пос.х}) = 1,32 (0,156 + 0,0068) = 0,215 \text{ Ом}$;

$R_{ш} = k_{нг} R_{ш.х} = 1,32 \cdot 46 = 60,7 \text{ Ом}$, где $k_{нг}$ - коэффициент нагрева ($k_{нг} = 1,24$ - для машин 1 - 3-й величин; $k_{нг} = 1,32$ для машин 4 - 6-й величин; $k_{нг} = 1,40$ для машин 7 - 11-й величин).

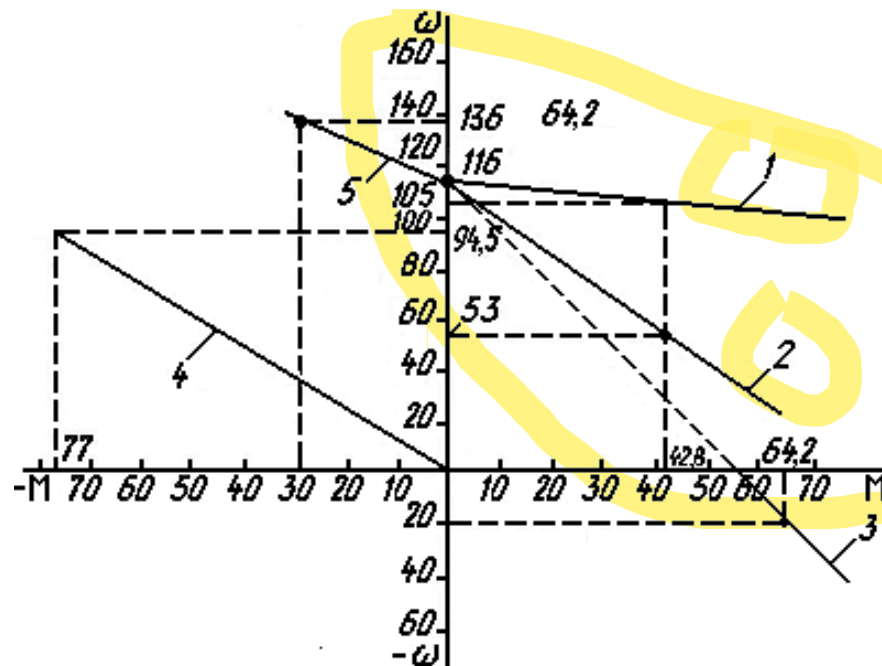


Рис. 4.2 Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения типа П-52 для режимов: двигательного (1-естественная; 2-искусственная); тормозного (3-противовключение; 4-динамическое; 5-рекуперативное торможение)

2. Ток возбуждения $I_{в} = U_{ном} / R_{ш} = 110 / 60,7 = 1,81 \text{ А}$.

3 Номинальный ток якоря $I_{аном} = I_{ном} - I_{в} = 50,5 - 1,81 = 48,7 \text{ А}$

4. Номинальная $E_{ном} = U_{ном} - I_{аном} R_a = 110 - 48,7 \cdot 0,215 = 99,5 \text{ В}$

5. Номинальная угловая скорость

$$\omega_{ном} = n_{ном} / 9,55 = 1000 / 9,55 = 105 \text{ рад / с}.$$

6. Угловая скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \omega_{ном} U_{ном} / E_{ном} = 105 \cdot 110 / 99,5 = 116 \text{ рад / с}.$$

7. Номинальный вращающий момент

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 4500 / 105 = 42,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Определив координаты двух точек, строим естественную механическую характеристику (прямая 1*) (рис. 4.2, а)

9. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{ном} = U_{ном} / I_{аном} = 110 / 48,7 = 2,26 \text{ Ом}$$

10. Добавочное сопротивление $R_{доб} = R_* R_{ном} = 0,4 \cdot 2,26 = 0,905 \text{ Ом}.$

11. Угловая скорость на искусственной характеристике при номинальном моменте

$$\omega' = \omega_0 [U_{ном} - I_{аном} (R_a + R_{доб})] / U_{ном} = 116 [110 - 48,7(0,215 + 0,905)] / 110 = 58,5 \text{ рад / с}$$

12. Определив координаты второй точки, строим искусственную механическую характеристику (кривая 2, рис. 4.2).

13. Коэффициент жесткости механических характеристик:

$$\beta_{ест} = \omega_0 / (\omega_0 - \omega_0') = 116 / (116 - 105) = 10,5;$$

$$\beta_{иск} = \omega_0 / (\omega_0 - \omega_0'') = 116 / (116 - 53) = 1,84.$$

Если вместо справочных данных имеются каталожные ($P_{ном}$, $U_{ном}$, $n_{ном}$, и $\eta_{ном} = 81\%$) то $I_{аном}$, $R_{ном}$, R_a также можно найти, но с меньшей точностью.

14. Номинальный ток двигателя

$$I_{ном} = P_{ном} / (U_{ном} \eta_{ном}) = 4500 / (110 \cdot 0,81) = 50,5 \text{ А}.$$

15. Номинальный ток якоря при $I_B / I_{ном} = 0,05$ будет

$$I_{аном} = I_{ном} (1 - I_B / I_{ном}) = 50,5 (1 - 0,05) = 48 \text{ А}.$$

16. Номинальное сопротивление $R_{ном} = U_{ном} / I_{аном} = 110 / 48 = 2,29 \text{ Ом}.$

17. Сопротивление цепи якоря двигателя (в нагретом состоянии)

$$R_a = 0,5 R_{ном} (1 - \eta_{ном}) = 0,5 \cdot 2,29 (1 - 0,81) = 0,218 \text{ Ом}.$$

Сравнивая результаты расчетов (п. 1 и 17, 3 и 15), убеждаемся, что они достаточно близки друг к другу.

Таблица 4.1

Испол- нение	Тип Двига- теля	Возбуждение												η , %	I , кг · м ²	$M_{жмд}$, Н · м, при возбуждении			
		последовательное						смешанное			Параллельное со стабилизирующей обмоткой и параллельное					после- довате- льном	сме- шан- ном	парал- лельном со ста- билизи- рующей обмотко й	пара- лель -
		Р, кВт	I_a , А	n , об/мин	η , %	Р, кВт	I_a , А	n , об/мин	η , %	Р, кВт	I_a , А	n , об/мин							
												со ста- били- зирую- щей обмот- кой	без стаби- лизиру- ющей обмотк и						
Тихо- ходное	Д12	2,5	16	1100	74	2,5	15	1175	77	2,5	14,6	1140	1180	79	0,051	86	71	62,8	54
	Д21	4,5	28	900	73	4,5	27	1050	76	4,5	26	1000	1030	77	0,013	191	143	127	113
	Д22	6,0	36	850	76	6,0	34	1050	80	6,0	33	1070	1100	82	0,016	270	191	162	137
	Д31	8,0	46	800	76	8,0	44	870	82	8,0	44	820	840	83	0,306	382	308	280	245
	Д32	12,0	69	675	81	12,0	66	780	83	12,0	65	740	770	84	0,433	676	515	466	402
Быстро- ходное	Д41	16,0	89	650	81	16,0	86	700	84	16,0	86	670	690	85	0,816	633	765	685	598
	Д21	5,5	33	1200	76	5,5	31	1450	79	5,5	31	1400	1440	80	0,013	177	127	113	981
	Д22	8,0	46	1200	78	8,0	44	1390	81	8,0	43,5	1450	1510	83	0,016	255	191	157	137
	Д31	12,0	67	1100	81	12,0	65	1280	83	12,0	64	1310	1360	84	0,306	412	314	255	226
	Д32	18,0	98	960	82	18,0	95	1100	86	18,0	94	1140	1190	86	0,433	715	550	452	383
Напряжение 440 в																			
Тихо- ходное	Д21	4,0	13	1050	73	4,0	12	1240	76	4,0	12	1200	1220	77	0,013	116	86	76	68
	Д31	6,7	19	800	79	6,7	19	850	82	6,7	19	860	875	83	0,306	255	211	176	157
	Д41	15,0	43	660	81	15,0	40	710	84	15,0	40	695	710	85	0,816	697	568	490	436
	Д808	37,0	100	525	85	-	-	-	-	37,0	96	565	575	88	2,040	2160	-	1470	1325
Быстро- ходное	Д22	7,0	20	1180	78	7,0	20	1420	81	7,0	19,5	1420	1460	83	0,016	182	132	112	98
	Д32	17,0	47	970	82	17,0	45	1150	86	17,0	45	1150	1190	86	0,433	535	-392	340	294
	Д806	32,0	85	900	86	-	-	-	-	32,0	82	980	1000	88	1,020	1080	-	745	658

Испол- нение	Тип дви- гате- ля	N	R _a , Ом	$\omega_{доп}$ на полюс	R _{доб} , обмот- ки Ом	Возбуждение																
						последовательное			смешанное				параллельное				параллельное со стабилизирующей обмоткой					
						$\omega_{пос}$	R _{пос}	Φ	$\omega_{пос}$	R _{пос}	$\omega_{пар}$	R _{пар}	I _{пар}	Φ	$\omega_{пар}$	R _{пар}	I _{пар}	Φ	$\omega_{ст}$	R _{ст}	Φ	
						на полюс	Ом	мВб	на полюс	Ом	на полюс	Ом	А	б	Ом	А	мВб	на полюс	Ом	мВб		
Напряжение 220 В																						
Тихо- ходно е	Д12	99 0	1,13	75	0,50	83	0,59	4,66	24	0,13	2000	496	0,39	4,6 9	1800	260	0,70	4,76	6	0,04 2	4,90	
	Д21	92 0	0,66	73	0,28	92	0,28	6,20	18	0,07	8500	228	0,80	5,6	1790	142	1,20	5,84	5	0,02 6	6,00	
	Д22	69 6	0,37	57	0,20	82	0,26	8,96	18	0,08	1620	206	0,87	7,7 4	1480	130	1,35	7,54	4	0,01 9	7,72	
	Д31	73 8	0,32	55	0,09	67	0,11	9,36	18	0,04	1600	140	1,25	8,8 9	1870	120	1,45	9,33	4	0,01 2	9,52	
	Д32	55 8	0,20	41	0,08	48	0,10	14,5 0	10	0,02	1370	132	1,35	13, 2	1470	94	1,85	13,5 0	4	0,00 9	14,0 0	
Быстр о- ходно е	Д41	49 2	0,11	36	0,05	40	0,05	18,0 0	9	0,02	1700	128	1,35	17, 2	1480	70	2,50	17,6 0	3	0,00 4	18,1 0	
	Д21	69 0	0,36	54	0,17	92	0,28	6,57	18	0,07	1850	228	0,80	5,7 6	1790	142	1,20	5,90	5	0,02 6	6,04	
	Д22	52 2	0,20	44	0,12	63	0,19	8,90	18	0,07	1620	206	0,87	8,0 4	1480	130	1,35	7,57	4	0,01 9	7,83	

	Д31	492	0,14	39	0,06	67	0,11	10,10	18	0,03	1600	140	1,25	8,96	1870	120	1,45	8,34	4	0,012	8,65
	Д32	372	0,08	28	0,04	39	0,05	16,40	10	0,02	1370	132	1,35	14,70	1470	94	1,85	13,70	4	0,009	14,20
	Д41	310	0,05	23	0,0283	40	0,05	19,60	9	0,02	1700	128	1,35	17,50	1480	70	2,50	18,10	3	0,004	18,70
Напряжение 440 В																					
Тихо- ходное	Д21	1610	2,40	127	1,14	210	1,80	6,08	47	0,50	1850	228	0,80	5,54	1790	142	1,20	5,80	5	0,026	5,89
	Д31	1476	1,67	120	0,46	142	0,63	9,25	38	0,17	1600	140	1,25	9,04	1870	120	1,45	8,89	4	0,012	9,03
	Д41	984	0,47	74	0,22	76	0,24	17,70	19	0,06	1700	128	1,35	17,00	1480	70	2,50	17,20	3	0,004	17,50
Быстро- ходное	Д808	556	0,014	40	0,07	60	0,01	40,30	-	-	-	-	-	-	1250	44	3,93	38,60	2	0,004	39,10
	Д22	1044	1,15	84	0,54	140	0,96	8,85	30	0,23	1620	206	0,87	7,8	1480	130	1,35	7,73	4	0,019	7,94
	Д32	738	0,39	55	0,14	82	0,26	16,20	21	0,07	1370	132	1,35	14,2	1470	94	1,85	13,80	4	0,009	14,30
	Д806	492	0,13	35	0,07	50	0,10	27,30	-	-	-	-	-	-	1400	65	2,70	25,30	2	0,005	25,80

Примечание. Для всех типов двигателей $2p=4$, $2a=2$.

ЗАДАНИЕ 4.1. Расчет механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Рассчитать и построить механические характеристики (естественную и искусственную) и определить их жесткость для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по данным табл. 4.1 и 4.2, если $R_{*доб} = 0,6$.

§ 4.9. Расчет пусковых сопротивлений электродвигателей независимого и параллельного возбуждения

Расчет пусковых сопротивлений для двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения существенно отличается от расчетов сопротивлений для двигателей последовательного и смешанного возбуждения ввиду того, что первые имеют прямолинейные, а вторые криволинейные механические характеристики.

Пример 4.6. Рассчитать пусковые сопротивления для двигателя (см. пример 4.1), если $I_{*1} = 2,2$, число пусковых ступеней $z = 3$.

Решение. 1. Относительное сопротивление цепи якоря $R_{*а} = R_a / R_{ном} = 0,218/2,26 = 0,0965$.

2. Относительный ток переключения

$$I_{*2} = I_{*1} \sqrt[z]{R_{*а} I_{*1}} = 2,2 \sqrt[3]{0,0965 \cdot 2,2} = 1,32.$$

Далее можно решать или аналитическим методом, или графическим, но результаты должны получиться одинаковыми. Рассмотрим оба метода.

Аналитический метод. 3. Кратность пусковых токов

$$\lambda = I_{*1} / I_{*2} = 2,2 / 1,32 = 1,67.$$

4. Относительные сопротивления ступеней:

$$R_{*1} = (1 / I_{*1}) [(\lambda - 1) / \lambda] = (1 / 2,2) [(1,67 - 1) / 1,67] = 0,182;$$

$$R_{*2} = R_{*1} / \lambda = 0,182 / 1,67 = 0,109; R_{*3} = R_{*2} / \lambda = 0,109 / 1,67 = 0,0655.$$

5. Сопротивления ступеней: $R_1 = R_{*1} R_{ном} = 0,182 \cdot 2,26 = 0,412 \text{ Ом}$, где

$R_{\text{ном}} = 2,26$ (см. пункт 9, пример 4.1);

$$R_2 = R_{*2} R_{\text{ном}} = 0,109 \cdot 2,26 = 0,246 \text{ Ом}; R_3 = R_{*3} R_{\text{ном}} = 0,0655 \cdot 2,26 = 0,148 \text{ Ом}.$$

6. Сопоставляем значение тока при полностью введенном сопротивлении в момент пуска и заданного в условии:

$$I_1 = U_{\text{ном}} / (R_a + R_1 + R_2 + R_3) = 110 / (0,218 + 0,412 + 0,246 + 0,148) = 107 \text{ А};$$

$$I_1 = 2,2 I_{\text{аном}} = 2,2 \cdot 48,7 = 107 \text{ А}.$$

Таким образом, сила тока при пуске с реостатом совпадает с заданным значением.

Графический метод. 7. Для получения пусковой диаграммы в относительных единицах (рис. 4.12) строим сначала естественную характеристику по двум точкам: холостого хода ($\omega_{*0} = 1; I_{*a} = 0$) и нормального режима ($\omega_{*\text{ном}} = \omega_{\text{ном}} / \omega_0 = 105 / 116 = 0,905; I_{*\text{аном}} = 1$). Проводим две вертикальные линии из точек $I_{*1} = 2,2$ и $I_{*2} = 1,32$. Строим ступенчатую кривую, причем точка 3 должна оказаться и на естественной характеристике, и на вертикальной линии, проведенной через точку $I_{*1} = 2,2$. Восстановим перпендикуляры un из $I_{*\text{ном}} = 1$ и an из $\omega_{*0} = 1$, получим точки к, л, м, н.

8. Масштаб сопротивлений $m_R = R_{\text{ном}} / un = 2,26 / 50 = 0,0452 \text{ Ом} / \text{мм}.$

9. Сопротивления ступеней пускового реостата:

$$R_1 = m_R \text{ кл} = 0,0452 \cdot 9 = 0,407 \text{ Ом}; R_2 = m_R \text{ лм} = 0,0452 \cdot 5 = 0,226 \text{ Ом};$$

$$R_3 = m_R \text{ мн} = 0,0452 \cdot 3 = 0,136 \text{ Ом}.$$

10. Сопоставляя результаты аналитического и графического методов (п. 5 и 9), убеждаемся, что они достаточно близки.

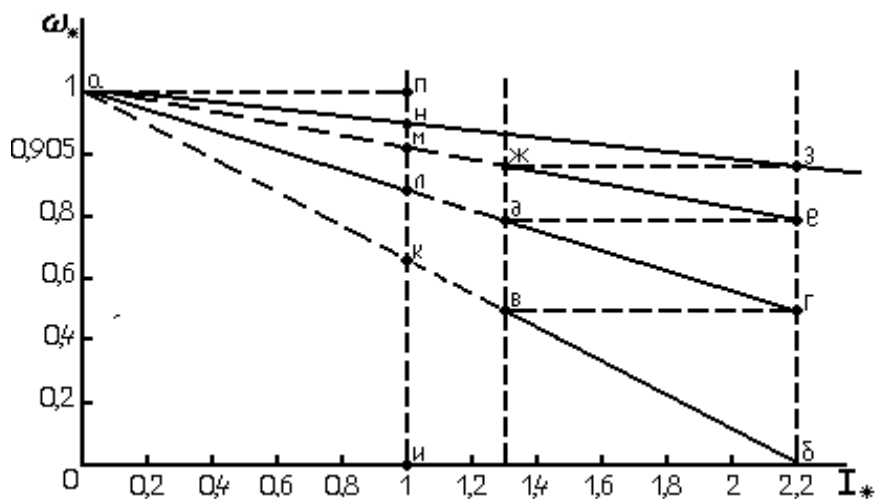


Рис. 4.12. Пусковая диаграмма к примеру 4.6.

ЗАДАНИЕ 4.4. Расчет пусковых сопротивлений для двигателя параллельного возбуждения.

Рассчитать сопротивления пусковых резисторов для двигателя из задания 4.1, если $z = 3, I_{*1} = 2,4$. Задачу решить аналитическим и графическим методами.

ЗАДАНИЕ 4.5. Выбор пусковых резисторов для двигателя постоянного тока.

Для двигателя из задания 4.4 выбрать ящик резисторов и составить схему соединения резисторов, если продолжительность пуска составляет 2,3 с (см. § 2.16).

§ 6.3. Расчет механических характеристик асинхронного двигателя

Уравнение (6.13) хотя и описывает полностью механическую характеристику, но использовать его для расчета затруднительно. Обычно используют более простую формулу - формулу Клосса:

$$M = M_{\text{макс}} (2 + q) / (s / s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}} / s + q),$$

где $M_{\text{макс}} = M_{\text{ном}} M_{* \text{макс}}$ максимальный момент ($M_{\text{ном}}$ определяется по паспортным данным и по формуле (1.14), а $M_{* \text{макс}}$ дается в каталоге);

$$s_{\text{кр}} = \pm r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

- критическое скольжение;

$$q = 2s_{\text{кр}} r_1 / r_2'$$

- коэффициент.

Параметры обмоток ротора и статора r_1, r_2', x_1, x_2' обычно в каталогах не указаны, но они приводятся в специальной справочной литературе [1].

В крупных электродвигателях сопротивление r_1 весьма мало, поэтому можно считать $q=0$ и применять приближенный способ расчета по упрощенной формуле Клосса:

$$M = 2M_{\text{макс}} / (s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s).$$

Иногда необходимо рассчитать характеристику только в ее рабочей части, где она почти прямолинейна. В этом случае применяют формулу

$$M = M_{\text{ном}} s / s_{\text{ном}}.$$

Искусственные характеристики рассчитываются по тем же формулам, но в (6.18) и (6.19) вместо r_2' следует подставлять полное активное сопротивление ротора с учетом добавочного резистора $R = r_2 + r_{\text{доб}}$. Приближенный способ расчета искусственных характеристик основан на определении $s_{\text{и}}$ из формулы $s_{\text{и}}/s = R_2/r_2$, где s – скольжение на естественной, а $s_{\text{и}}$ на искусственной характеристиках.

Пример 6.1. Рассчитать естественную и искусственную механические характеристики кранового асинхронного двигателя МТФ21М6, если: ПВ =40%, $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт, $n = 930$ об/мин, $I_{1\text{ном}} = 21$ А, $U_{\text{ном}} = 220/380$ В, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,7$, $\eta_{\text{ном}} = 77\%$, $M_{* \text{макс}} = 2,1$, $J = 0,46$ кг*м², $n_{\text{макс}} = 2500$ об/мин, $E_2 = 256$ В, $I_{2\text{ном}} =$

19,8 А, $r_{доб} = 0,8 \text{ Ом}$. Так как в каталоге не указаны значения r_1, r_2', x_1, x_2' , то формулу (6.17) применить не удастся. Воспользуемся (6.20).

Решение. 1. Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_2)/n_1 = (1000 - 930)/1000 = 0,07.$$

2. Критическое скольжение определяют из формулы (6.20) для номинального режима в относительных единицах:

$$s_{*кп} = M_{*макс} s + \sqrt{(M_{*ном} s_{\text{ном}}^2)^2 - s_{\text{ном}}^2} = 2,1 \cdot 0,07 + \sqrt{(2,1 + 0,07)^2 - 0,07^2} = 0,276.$$

3. Задаемся различными значениями скольжения и по (6.20) определяем соответствующие относительные моменты

$$M_* = 2M_{*макс} / (s/s_{кп} + (s_{кп}/s)) = 2 \cdot 2,1 / (s/0,276) + (0,276/s).$$

Результаты заносим в табл. 6.1.

4. Номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 7500 / 930 = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Моменты при различных скольжениях: $M = M_* M_{\text{ном}} = 1 \cdot 77 = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

$$M = M_* M_{\text{ном}} = 2 \cdot 77 = 154 \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ (табл. 6.1).}$$

6. Частота вращения и угловая скорость ротора:

$$n_2 = (1 - s)n_1 = (1 - 0)1000 = 1000 \text{ об/мин}; \omega_2 = 1000/9,55 = 104,5 \text{ рад/с}$$

$$n_2 = (1 - s)n_1 = (1 - 0,07)1000 = 930 \text{ об/мин}; \omega_2 = 930/9,55 = 97,5 \text{ рад/с и}$$

т.д. (табл. 6.1).

7. Для расчета искусственной характеристики определяем номинальное сопротивление ротора $R_{2\text{ном}} = E_{2\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}) = 256 / \sqrt{3} \cdot 19,8 = 7,46 \text{ Ом}$.

Таблица 6.1

Режим	Параметры естественной характеристики							
	$s_{\text{ном}}$	s	$\frac{0,276}{s}$	$\frac{s}{0,276} + \frac{0,276}{s}$	M_*	$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$n_2,$ об/мин	$\omega_2,$ рад/с
Идеаль-	0	0	∞	∞	0	0	1000	104,5

ный хо- лостой ход								
Двига- тельный	0,070	0,25	3,940	4,19	1,0	77	930	97,5
	0,200	0,72	1,380	2,10	2,0	154	800	83,7
	0,276	1,00	1,000	2,00	2,1	162	724	75,8
	0,400	1,45	0,690	2,14	1,96	149	600	62,8
	0,600	2,18	0,463	2,64	1,59	123	400	419
	0,800	2,90	0,345	3,24	1,3	100	200	20,9
Короткое замыка- ние	1,000	3,62	0,276	3,90	1,08	83	0	0
Противо- включе- ние	1,300	4,71	0,212	4,92	0,85	66	-300	-31,4
					5			
	1,600	5,8	0,172	5,97	0,70	54	-600	-62,8
					3			
Рекупе- ративное тормо- жение	2,000	7,25	0,138	7,39	0,56	44	-1000	-104,5
					8			
	-0,070	-0,25	-3,940	-4,19	-1,00	-77	1070	112
	-0,200	-0,72	-1,380	-2,10	-2,00	-154	1200	126
	-0,276	-1,00	-1,000	-2,00	-2,10	-162	1276	133
	-0,400	-1,45	-0,690	-2,14	-1,96	-149	1400	147
	-0,600	-2,18	-0,463	-2,64	-1,59	-123	1600	167
	-0,800	-2,90	-0,345	-3,24	-1,30	-100	1800	188
	-1,000	-3,62	-0,276	-3,90	-1,08	-83	2000	209

8. Сопротивление обмотки ротора $r_2 = s_{\text{ном}} R_{2\text{ном}} = 0,07 \cdot 7,46 = 0,522 \text{ Ом}.$

9. Относительное сопротивление цепи ротора с включенным резистором

$$R_{*2} = s_{\text{ном}} + r_{\text{доб}} / R_{2\text{ном}} = 0,07 + 0,8 / 7,46 = 0,177.$$

10. Определяем отношение $s_{\text{и}} / s = R_{*2} / r_{*2} = 0,177 / 0,07 = 2,53.$

11. Скольжение на искусственной характеристике определяем по естественной характеристике:

$$s_{\text{и}} = s s_{\text{и}} / s = 0,07 \cdot 2,53 = 0,177; s_{\text{и}} = 0,2 \cdot 2,53 = 0,507 \text{ (табл. 6.2).}$$

12. Частота вращения и угловая скорость на искусственной характеристике

$$n_{и2} = (1 - s_{и})n_1 = (1 - 0,173)1000 = 823 \text{ об/мин};$$

$$\omega_{и2} = n_{и2} / 9,55 = 823 / 9,55 = 86,5 \text{ рад/с}$$

$$n_{и2} = (1 - 0,507)1000 = 493 \text{ об/мин}; \omega_{и2} = 463 / 9,55 = 51,7 \text{ рад/с}$$

и т.д. (табл. 6.2).

13. Строим механические характеристики $\omega_2 = f(M)$ и $\omega_{и2} = f(M)$

(рис. 6.4).

Таблица 6.2

Режим	Параметры искусственной характеристики		
	$s_{и}$	$n_{и}$, об/мин	$\omega_{и}$, рад/с
Идеальный холостой ход	0	1000	104,5
Двигательный	0,177	823	86,5
	0,507	493	51,7
	0,700	300	31,4
Противовключение	1,010	-10	-1,0
	1,520	-520	-54,5
	2,020	-1020	-107
	2,530	-1530	-160
	3,290	-2290	-240
	4,050	-3050	-320
	5,060	-4060	-425
Рекуперативное торможение	-0,177	1177	123
	-0,507	1507	158
	-0,700	1700	178
	-1,010	2010	210
	-1,520	2520	264

	-2,080	3020	316
	-2,530	3530	370

ЗАДАНИЕ 6.1. Расчет механических характеристик асинхронного двигателя

Рассчитать и построить естественную механическую характеристику кранового асинхронного двигателя с фазным ротором серии МТФ и искусственную при $\gamma_{*доб} 0,1$. Паспортные данные двигателей приводятся в табл. 6.3.

§ 6.4. Расчет пусковых и тормозных резисторов асинхронных электродвигателей

Проблемы, возникающие при пуске асинхронных двигателей, близки к проблемам, возникающим при пуске двигателей постоянного тока. Общим является факт протекания большого пускового тока, что опасно с точки зрения перегрева обмоток статора и ротора. В то же время снижается напряжение сети, отрицательно влияющее на работу других потребителей.

Тип электро- двигателя	P ₂ , кВт						n, об/мин	I ₁ , А при U=380 В	cos φ	η, %	I ₂ , А	U ₂ , В	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$	J, кг · м ²	m, кг	n _{макс} , об/мин
	при ПВ, %															
	при t, мин															
MTF 011-6	15	25	40	60	30	60	800	7,1	0,78	55	16,5					
	2						850	5,9	0,72	60	12,0					
	1,7						885	5,3	0,65	61	9,1	116	2,0	0,08	51	2500
	1,4						910	5,1	0,59	60	7,5					
	1,2						785	10,4	0,78	58	18,5					
	3,1						840	8,9	0,74	62	15,0					
MTF 012-6	2,7						890	7,6	0,68	64	11,5	144	1,9	0,11	58	2500
	2,2						920	7,04	0,57	64	8,4					
	1,7						850	12,8	0,81	66	21,0					
	4,5						870	11,7	0,79	68	18,7					
MTF 111-6	4,1						895	10,4	0,73	70	15,0	165	1,9	0,20	76	2500
	3,5						920	9,1	0,65	72	11,5					
	2,8						895	17,5	0,78	72	23,0					
MTF 112-6	6,5						915	16,0	0,74	74	20,2					
	5,8						930	14,4	0,7	75	16,9	203	2,4	0,27	88	2500
	5						950	13,2	0,62	74	13,0					
	4						895	27,5	0,78	74	30,0					
	10,5						915	24,0	0,74	77	25,0					

MTF 211-6	9			930	21,0	0,7	77	19,8	256	2,1	0,46	120	2500
	7,5			945	18,5	0,63	78	15,5					
	6			925	37,0	0,76	75	56,9					
	14			935	34,5	0,74	77	51,0					
MTF 311-6	13			945	30,5	0,69	79	42,0	172	2,5	0,90	170	2500
	11			960	28,0	0,63	77	34,0					
	9			665	29,0	0,78	71	32,0					
	10,5			680	25,6	0,74	72	26,0					
MTF 311-8	9			695	22,8	0,68	73	21,0	245	3,0	1,1	170	1900
	7,5			710	21,0	0,6	72	16,0					
	6			680	37,5	0,80	76	63,0					
	15			695	34,0	0,76	76	53,0					
MTF 312-8	13			705	30,5	0,71	77	43,0					
	8,2			720	27,0	0,61	75	32,0	165	3,0	1,55	210	1900
	40			960	94	0,77	84	100					
	36			965	86	0,75	84,5	88					
MTF 412-6	30			970	75	0,71	85,5	73	255	2,5	2,7	345	2500
	25			975	70	0,65	83,3	61					

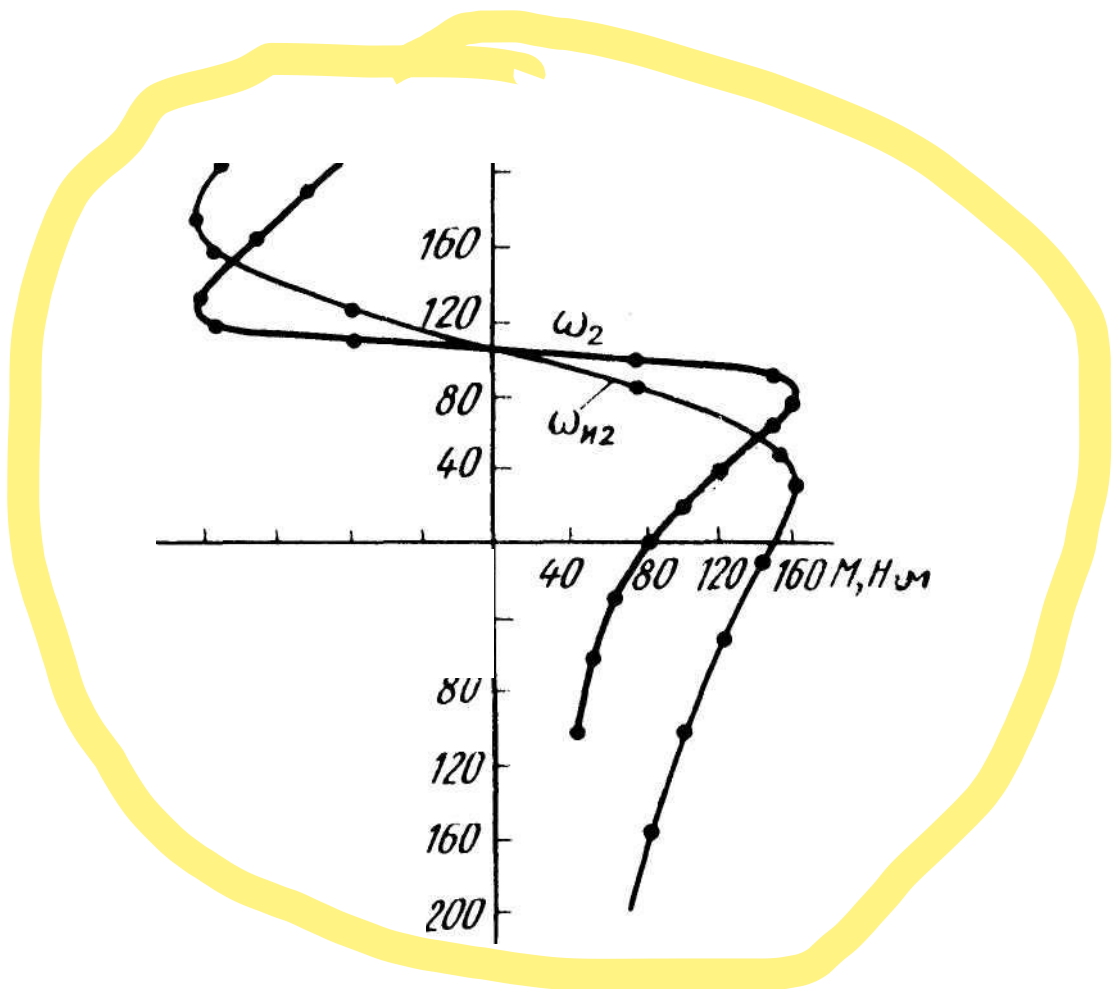


Рис.6.4 Механические характеристики двигателя MTF211-6

В отличие от двигателей постоянного тока, имеющих коллектор, в асинхронных двигателях нет искрения, ограничивающего пуск двигателя. С другой стороны, пусковой момент в асинхронных двигателях меньше, чем в двигателях постоянного тока.

Пусковой момент асинхронного двигателя желательно принимать $M_{*п1} \leq 0,85M_{*макс}$. Момент переключения пусковых ступеней можно определить различными способами: аналитическим или графическим. Первый целесообразен, когда пуск происходит в пределах $M_{п1} \leq 0,75M_{макс}$. При больших пусковых моментах приходится применять графический метод.

Пример 6.2. Для двигателя MTF211-6 (см. пример 6.1) рассчитать сопротивление пусковых ступеней трехступенчатого реостата, если $M_{*п1} = 1,5$.

Решение. 1. Пусковой момент относительно максимального

$M_{*н1}/M_{*макс} = 1,5/2,1 = 0,715 < 0,75$, поэтому применяем аналитический метод.

2. Пусковой момент $M_{п1} = 1,5M_{ном} = 1,5 \cdot 77 = 115 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

3. Момент переключения

$$M_{п2} = M_{п1} \sqrt[3]{M_{п1} s_{ном} / M_{ном}} = 115 \sqrt[3]{115 \cdot 0,07 / 77} = 54,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Кратность пусковых моментов $\lambda = M_{п1} / M_{п2} = 115 / 54,3 = 2,12$.

5. Полное сопротивление цепи ротора на первой ступени

$$R_{*1} = 1 / M_{*п1} = M_{ном} / M_{п1} = 77 / 115 = 0,67 \text{ или } R_{*1} R_{2ном} = 0,67 \cdot 7,46 = 5 \text{ Ом}.$$

6. Полное сопротивление на второй и третьей ступенях

$$R_2 = R_1 / \lambda = 5 / 2,12 = 2,36 \text{ Ом}; R_3 = R_2 / \lambda = 2,36 / 2,12 = 1,11 \text{ Ом}.$$

7. Сопротивления секций $r_{п1} = R_1 (\lambda - 1) / \lambda = 5(2,12 - 1) / 2,12 = 2,62 \text{ Ом};$

$$r_{п1} = r_1 / \lambda = 2,62 / 2,12 = 1,23 \text{ Ом} \quad r_{п3} = r_2 / \lambda = 1,23 / 2,12 = 0,583 \text{ Ом}.$$

Пример 6.3. Для двигателя МТФ211-6 (см. пример 6.1) рассчитать сопротивления пусковых ступеней трехступенчатого реостата, если $M_{*п1} = 1,71$.

Решение. 1. Пусковой момент относительно максимального

$M_{*п1} / M_{*макс} = 1,71 / 2,1 = 0,815 > 0,75$ поэтому используем графический метод.

2. Строим естественную механическую характеристику по результатам расчетов примера 6.1 (рис. 6.5).

3. Пусковой момент $M = 1,71M = 1,71 \cdot 77 = 132 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4. Произвольно выбираем момент переключения $M_{п2} = 88 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и составляем два перпендикуляра из точек а и б.

Проводим прямую через полу ценные точки з и и пересечения этих перпендикуляров с естественной характеристикой до пересечения с горизонталью, проходящей через точку на оси $\omega_1 = 104,5 \text{ рад/с}$. Получаем точку к. Строим прямую бк, а затем пусковую диаграмму абвгдежз. При этом точка з должна оказаться на естественной характеристике. Если эта точка не будет принадлежать естественной характеристике, то выбираем $M_{п2}$ другой величины и повто-

5. Проводим вертикаль из точки номинального момента $M_{\text{ном}} = 77 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и отмечаем точки пересечения с лучами пусковой диаграммы m, n, p, c . Сопротивления ступеней пускового реостата определяем по номинальному сопротивлению ротора $R_{2\text{ном}}$:

$$r_3 = R_{2_{\text{HOM}}}(\overline{\Pi\Pi}/\overline{\text{сл}}) = 7,46(2,5/52) = 0,359\text{Ом}.$$

Если известно семейство механических характеристик, то пусковые сопротивления можно рассчитать по методу, описанному в § 4.13.

ЗАДАНИЕ 6.2. Расчет сопротивлений пусковых резисторов для асинхронного двигателя.

Рассчитать сопротивления пусковых резисторов для двигателя из задания 6.1, если $z = 3$ и $M_{*п1} = 1,6$.

Пример 6.4. Для двигателя МТФ211-6 рассчитать сопротивление тормозного резистора:

в режиме противовключения, если $M_{п} = 0,6M_{\text{макс}}$ и $\omega_{п} = -\omega_{\text{ном}}$;

в режиме рекуперативного торможения, если $M_{\text{рек}} = 0,91M_{\text{ном}}$ и $\omega_{р} = 140 \text{ рад/с}$;

Решение. Режим противовключения. 1. Считая, что $M_{п} = I_{2п}$, находим ток ротора при торможении противовключением

$$I_{2п} = I_{2\text{ном}} M_{п} / M_{\text{ном}} = I_{2\text{ном}} 0,6M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}} = 19,8 \cdot 0,6 \cdot 2,1 = 25 \text{ А}.$$

2. Полное сопротивление при торможении противовключением

$$R_{п} = 2E_{2\text{ном}} / (\sqrt{3}I_{2п}) = 2 \cdot 256 / (\sqrt{3} \cdot 25) = 11,9 \text{ Ом}.$$

3. Сопротивление тормозной секции, включенной последовательно с пусковым резистором (см. пример 6.2)

$$r_{п} = R_{п} - (r_2 + r_{п1} + r_{п2} + r_{п3}) = 11,9 - (0,544 + 2,76 + 1,26 + 0,61) = 6,726 \text{ Ом}.$$

4. Для графического расчета этого же резистора отложим точку m (см. рис. 6.5) с координатами

$$M_{п} = 0,6M_{\text{макс}} = 0,6 \cdot 162 = 97,2 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad \omega_{п} = -97,5 \text{ рад/с}.$$

5. Строим механическую характеристику km и находим точку y на пересечении ее с вертикалью номинального режима.

6. Определяем сопротивление тормозной секции противовключения $z'_{п} = m_R \cdot \overline{my} = 0,144 \cdot 45 = 6,47 \text{ Ом}$. Сравнивая результаты аналитического и графического методов (пункты 3 и 6), убеждаемся, что они достаточно близки.

Режим рекуперативного торможения. 1. Скольжение при рекуперативном торможении

$$s_{\text{рек}} = (\omega_1 - \omega_{\text{рек}}) / \omega_1 = (104,5 - 140) / 104,5 = -0,34.$$

2. Ток ротора в начале торможения

$$I_{2\text{рек}} = I_{2\text{ном}} M_{\text{рек}} / M_{\text{ном}} = 19,8 \cdot 0,91 = 18 \text{ А}.$$

3. Полное сопротивление при рекуперативном торможении

$$R_{\text{рек}} = E_{2\text{ном}} s_p / (\sqrt{3} I_{2\text{рек}}) = 256 \cdot 0,34 / (\sqrt{3} \cdot 18) = 2,78 \text{ Ом}.$$

4. Сопротивление тормозной секции рекуперативного торможения, включаемой последовательно с ротором,

$$r_{\text{рек}} = R_{\text{рек}} - r_2 = 2,78 - 0,544 = 2,236 \text{ Ом}.$$

5. Для графического расчета этого резистора строим механическую характеристику рекуперативного торможения по заданным условиям. Отложим точку m' с координатами: $M_{\text{рек}} = -0,91 \cdot M_{\text{ном}} = -0,91 \cdot 77 = -70 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $\omega = 140 \text{ рад/с}$, или точку m'' , симметричную ей относительно u с координатами: $M_{\text{рек}} = 70 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и

$$\omega = 104,5 - (140 - 104,5) = 67 \text{ рад/с (рис. 6.5)}.$$

6. Находим точку ϕ на пересечении этой механической характеристики с вертикалью номинального режима и определяем сопротивление тормозной секции $r'_{\text{рек}} = m_R \cdot \overline{p\phi} = 0,144 \cdot 15,5 = 2,23 \text{ Ом}.$

Сравнивая результаты расчета (пункты 4 и 6), убеждаемся, что они достаточно близки.

ЗАДАНИЕ 6.3. Расчет сопротивлений тормозных резисторов для асинхронного двигателя.

Для двигателя из задания 6.2 рассчитать сопротивление тормозного резистора: в режиме противов-ключения, если $M_{\text{п}} = 0,5 M_{\text{макс}}$ и $\omega_{\text{п}} = -0,75 \omega_{\text{ном}}$; в режиме рекуперативного торможения, если $M_{\text{рек}} = 0,8 M_{\text{ном}}$ и $\omega_p = 1,5 \omega_{\text{ном}}.$

§ 8.3. Переходные режимы при нелинейной совместной характеристике

Если механическая характеристика двигателя или механизма нелинейна, то и совместная характеристика также получается нелинейной.

Прежде чем приступить к расчету переходного процесса, следует разделить совместную характеристику на отдельные участки такой длины, чтобы можно было пренебречь их кривизной и считать их прямолинейными. Далее можно воспользоваться одним из двух методов: линеаризации или конечных приращений. Рассмотрим их на примере.

Пример 8.1. Определить время переходного процесса при пуске и путь, пройденный за это время для электродвигателя с механической характеристикой, заданной по точкам:

ω , рад/с .	0	20	32	40	60	80	100	120	140	160	180	200
M , Н · м .	146	162	165	163	140	94	16	- 65	- 120	- 156	- 168	- 145

Момент сопротивления механизма $M_c = 30 \text{ Н} \cdot \text{м}$, общий момент инерции $J = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Решение. Строим совместную характеристику (рис. 8.3) по формуле $M_{\text{дин}} = M - M_c$ и разбиваем ее на отдельные участки: $\omega_1 = 20 \text{ рад/с}$, $\omega_2 = 42 \text{ рад/с}$, $\omega_3 = 60 \text{ рад/с}$, $\omega_4 = 76 \text{ рад/с}$, $\omega_5 = \omega_{\text{уст}} = 95 \text{ рад/с}$,

Метод линеаризации. 1. Через начало и конец каждого участка проведем прямую до пересечения с вертикальной осью. Получим установившиеся угловые скорости участков и соответственно динамические моменты:

$$\omega_{\text{уст1}} = -170 \text{ рад/с}, \omega_{\text{уст3}} = 160 \text{ рад/с}, \omega_{\text{уст4}} = 108 \text{ рад/с}, \omega_{\text{уст5}} = 95 \text{ рад/с},$$

$$M_{\text{дин0}} = 116 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{дин1}} = M_{\text{дин2}} = 132 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{дин3}} = 113 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин4}} = 75 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{дин5}} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

2. Для 1-го участка (0-1)

$$T_{\text{м1}} = J(\omega_{\text{уст1}} - \omega_0) / M_{\text{дин0}} = 1,2(170 - 0) / 116 = -1,76 \text{ с};$$

$$t_1 = T_{\text{м1}} \ln(M_{\text{дин0}} / M_{\text{дин1}}) = -1,76 \ln(116 / 132) = 0,224 \text{ с};$$

$$\varphi_1 = \omega_{уст1} t_1 - T_{м1}(\omega_{уст1} - \omega_0)(1 - e^{-t_1/T_{м1}}) = -170 \cdot 0,224 - 1,76 \cdot 170(1 - e^{-0,224/1,76}) = 2,5 \text{ рад}$$

3. Для 2-го участка (1-2)

$$t_2 = J(\omega_2 - \omega_1)/M_{дин2} = 1,2(42 - 20)/132 = 0,2 \text{ с};$$

$$\varphi_2 = \omega_1 t_2 + M_{дин2} t_2^2 = 20 \cdot 0,2 + 132 \cdot 0,2^2 / (2 \cdot 1,2) = 6,2 \text{ рад}.$$

4. Для 3-го участка (2-3)

$$T_{м3} = J(\omega_{уст3} - \omega_2)/M_{дин2} = 1,2(160 - 42) = 1,01 \text{ с};$$

$$t_3 = T_{м3} \ln(M_{дин2}/M_{дин3}) = 1,07 \ln(132/113) = 0,168 \text{ с};$$

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \omega_{уст3} t_3 - T_{мех3}(\omega_{уст3} - \omega_2)(1 - e^{-t_3/T_{м3}}) = \\ &= 160 \cdot 0,168 - 1,25(160 - 42)(1 - e^{-0,168/1,25}) = 8,3 \text{ рад} \end{aligned}$$

5. Для 4-го участка (3-4)

$$T_{м4} = J(\omega_{уст4} - \omega_3)/M_{дин3} = 1,2(108 - 60)/113 = 0,51 \text{ с};$$

$$t_4 = T_{м4} \ln(M_{дин3}/M_{дин4}) = 0,51 \ln(113/75) = 0,21 \text{ с};$$

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= \omega_{уст4} t_4 - T_{м4}(\omega_{уст4} - \omega_3)(1 - e^{-t_4/T_{м4}}) = \\ &= 108 \cdot 0,21 - 0,51(108 - 60)(1 - e^{-0,21/0,51}) = 14,5 \text{ рад} \end{aligned}$$

6. Для упрощения расчета пятого участка (4-5) считаем, что переходный процесс заканчивается в точке 5 при $\omega_{уст5} = 0,98$ $\omega_{уст} = 0,98 \cdot 95 = 93 \text{ рад/с}$, что соответствует согласно графику (см. рис. 6.3), $M_{дин5} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и определяем

$$T_{м5} = J(\omega_{уст5} - \omega_4)/M_{дин4} = 1,2(95 - 76) = 0,304 \text{ с};$$

$$t_5 = T_{м5} \ln(M_{дин4}/M'_{дин5}) = 0,304 \ln(75/10) = 0,612 \text{ с};$$

$$\begin{aligned} \varphi_5 &= \omega_{уст5} t_5 - T_{м5}(\omega_{уст5} - \omega_4)(1 - e^{-t_5/T_{м5}}) = \\ &= 95 \cdot 0,612 - 0,304(95 - 76)(1 - e^{-0,612/0,304}) = 53,1 \text{ рад} \end{aligned}$$

7. Общее время переходного процесса и путь, пройденный за это время:

$$t_{об} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 0,224 + 0,2 + 0,168 + 0,21 + 0,612 = 1,41 \text{ с};$$

$$\varphi_{об} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = 2,5 + 6,2 + 8,3 + 14,5 + 53,1 = 84,6 \text{ рад}.$$

Метод конечных приращений. 1. Для каждого участка находим средний динамический момент и считаем, что он не изменяется на протяжении всего участка. Заменяем плавную кривую ступенчатой (см. рис. 8.3)

$$M_{\text{дин.ср1}} = (M_{\text{дин0}} + M_{\text{дин1}})/2 = (116 + 132)/2 = 124 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.ср2}} = (M_{\text{дин1}} + M_{\text{дин2}})/2 = (132 + 132)/2 = 132 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.ср3}} = (M_{\text{дин2}} + M_{\text{дин3}})/2 = (132 + 113)/2 = 122 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.ср4}} = (M_{\text{дин3}} + M_{\text{дин4}})/2 = (113 + 75)/2 = 94 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин.ср5}} = (M_{\text{дин4}} + M'_{\text{дин5}})/2 = (75 + 10)/2 = 42 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Здесь, как и в методе линеаризации (см. п. 6), считаем, что пятый участок заканчивается при достижении скорости $\omega_5 = 93 \text{ рад/с}$ и $M_{\text{дин5}} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

2. Для 1-го участка (0-1) определяем время и путь:

$$t_1 = J(\omega_1 - \omega_0)/M_{\text{дин.ср1}} = 1,2(20 - 0)/124 = 0,193 \text{ с};$$

$$\varphi_1 = \omega_0 t_1 + (M_{\text{дин.ср1}}/J)(t_1^2/2) = 0 \cdot 0,193 + (124/1,2)(0,193^2/2) = 1,91 \text{ рад}.$$

3. Для 2-го участка (1-2)

$$t_2 = J(\omega_2 - \omega_1)/M_{\text{дин.ср2}} = 1,2(42 - 20)/132 = 0,2 \text{ с};$$

$$\varphi_2 = \omega_1 t_2 + M_{\text{дин.ср2}} t_2^2 / (2J) = 20 \cdot 0,2 + 132 \cdot 0,2^2 / (2 \cdot 1,2) = 6,2 \text{ рад}.$$

4. Для 3-го участка (2-3)

$$t_3 = J(\omega_3 - \omega_2)/M_{\text{дин.ср3}} = 1,2(60 - 42)/122 = 0,177 \text{ с};$$

$$\varphi_3 = \omega_2 t_3 + M_{\text{дин.ср3}} t_3^2 / (2J) = 42 \cdot 0,177 + 122 \cdot 0,177^2 / (2 \cdot 1,2) = 9,36 \text{ рад}.$$

5. Для 4-го участка (3-4)

$$t_4 = J(\omega_4 - \omega_3)/M_{\text{дин.ср4}} = 1,2(76 - 60)/94 = 0,204 \text{ с};$$

$$\varphi_4 = \omega_3 t_4 + M_{\text{дин.ср4}} t_4^2 / (2J) = 60 \cdot 0,24 + 94 \cdot 0,204^2 / (2 \cdot 1,2) = 13,88 \text{ рад}.$$

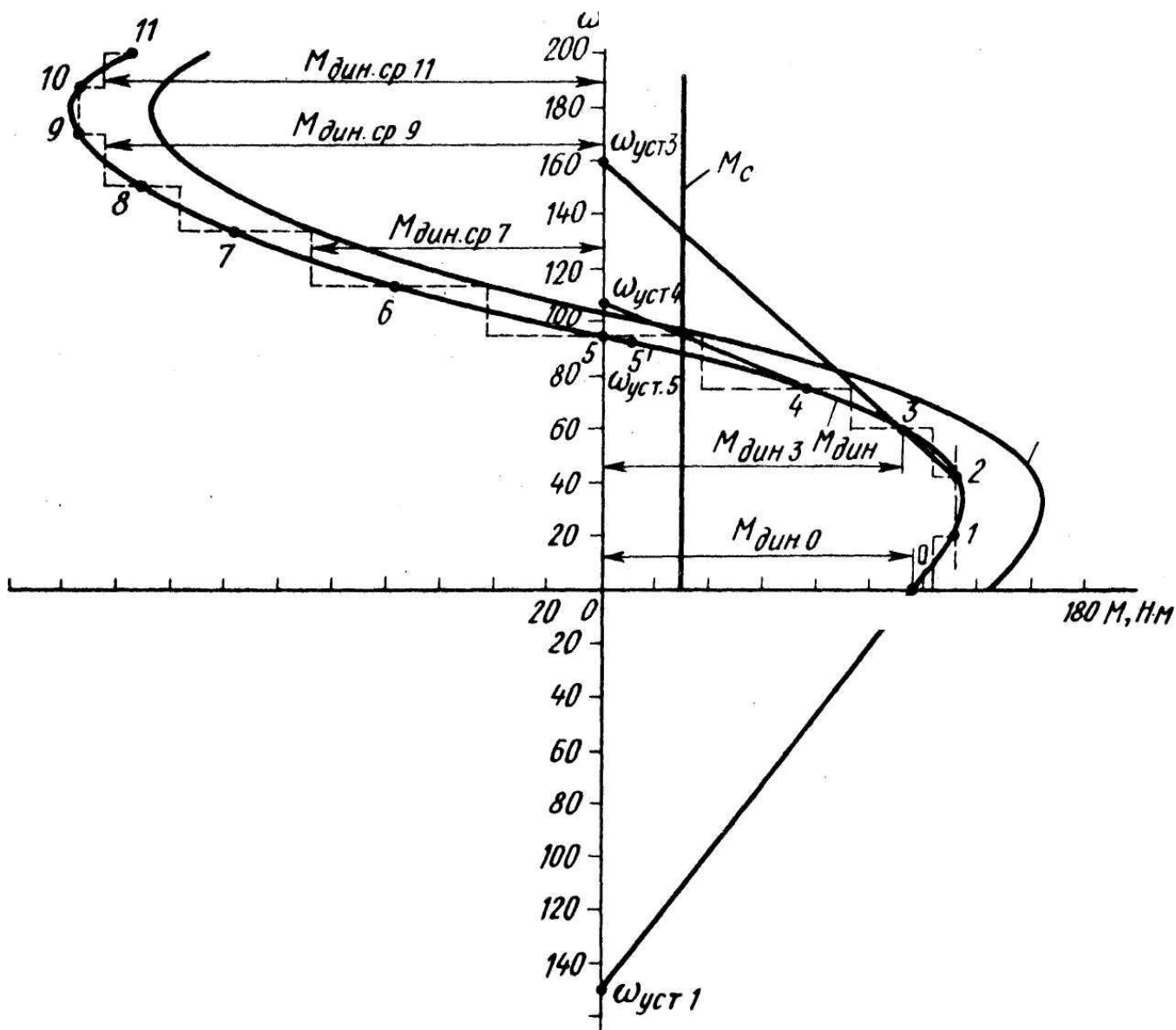


Рис.8.3 Совместная характеристика для расчета переходных процессов
(к примеру 8.1)

6. Для 5-го участка (4-5)

$$t_5 = J(\omega_5 - \omega_4) / M_{\text{дин.ср}5} = 1,2(93 - 76) / 42 = 0,485 \text{ с} ;$$

$$\varphi_5 = \omega_4 t_5 + M_{\text{дин.ср}5} t_5^2 / (2J) = 76 \cdot 0,485 + 42 \cdot 0,485^2 / (2 \cdot 1,2) = 40,97 \text{ рад} .$$

7. Общее время переходного процесса и путь пройденный за это время:

$$t_{\text{об}} = \sum t = 0,193 + 0,2 + 0,177 + 0,204 + 0,485 = 12,59 \text{ с} ;$$

$$\varphi_{\text{об}} = \sum \varphi = 1,91 + 6,2 + 9,36 + 13,88 + 40,97 = 72,32 \text{ рад} .$$

Сравнивая результаты расчетов (табл. 8.1), убеждаемся что они достаточно близки (рис. 8.4). Метод линеаризации точнее, но требует более сложных вычислений.

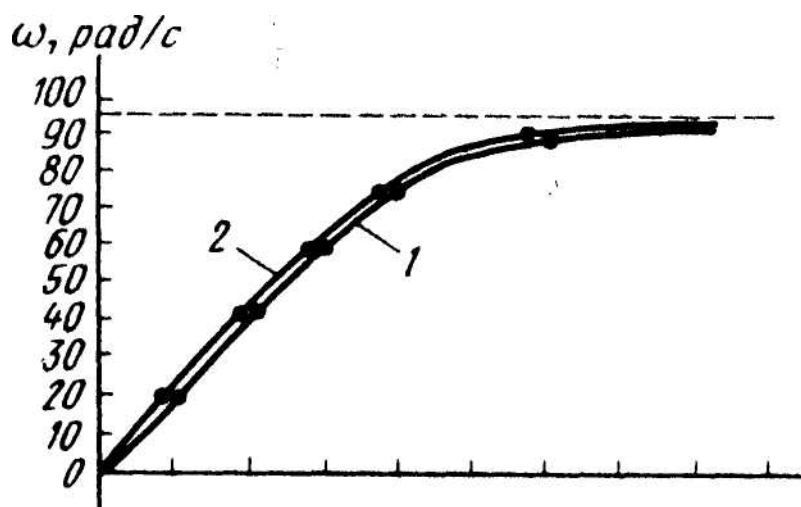


Рис. 8.4. График изменения скорости при пуске двигателя, рассчитанный:
1 - методом линеаризации; 2 – методом конечных приращений.

Таблица 8.1

Учас- ток	Метод линеаризации					Метод конечных приращений							
	ω , рад/с	$\omega_{уст}$, рад/с	$M_{дин}$, Н · м	T_m , с	t , с	φ , рад	$t_{общ}$, с	$\varphi_{общ}$, рад	$M_{дин}$, Н · м	t , с	φ , рад	$t_{общ}$, с	$\varphi_{общ}$, рад
1-й	20	-170	132	-1,76	0,224	2,5	0,224	2,5	124	0,193	1,91	0,193	1,91
2-й	42	-	132	-	0,200	6,2	0,424	8,7	132	0,200	6,2	0,393	8,11
3-й	60	160	113	1,01	0,168	8,3	0,592	17,0	122	0,177	9,36	0,57	17,47
4-й	76	108	75	0,51	0,210	14,5	0,802	31,5	94	0,204	13,88	0,771	31,35
5-й	95	95	10	0,304	0,612	53,1	1,414	84,6	42	0,485	40,97	1,259	72,32

ЗАДАНИЕ 8.1. Расчет переходного процесса асинхронного двигателя.

Определить время переходного процесса при рекуперативном торможении двигателя, рассмотренного в примере 8.1, методом конечных приращений от точки 11 (см. рис. 8.3) до установившегося значения.

Предварительно задаемся граничными значениями участков кривой динамического момента: $\omega_6 = 115 \text{ рад/с}$; $\omega_7 = 135 \text{ рад/с}$; $\omega_8 = 150 \text{ рад/с}$;
 $\omega_9 = 170 \text{ рад/с}$; $\omega_{10} = 188 \text{ рад/с}$; $\omega_{11} = 200 \text{ рад/с}$; $M_{\text{дин}6} = 78 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
 $M_{\text{дин}7} = 135 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{дин}8} = 170 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{дин}9} = 194 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{дин}10} = 191 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
 $M_{\text{дин}11} = 175 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

§ 9.3. Выбор мощности электродвигателя для продолжительного режима работы

Режим считается продолжительным, если его длительность такова, что все части двигателя за время работы успевают нагреться до установившейся температуры. При этом нагрузка может быть равномерной (рис. 9.2, а) и неравномерной (рис. 9.2,б). При колебаниях нагрузки температура несколько изменяется.

Если известно, что механизм должен работать с продолжительной равномерной нагрузкой P_c , то двигатель выбирают по каталогу из условия, что его номинальная мощность $P_{\text{ном}} \geq P_c$; учитывают тип двигателя, требуемую частоту вращения, напряжение сети, исполнение двигателя и т. д.

Рис. 9.2. Нагрузочные диаграммы двигателя при длительном режиме с равномерной (а) и неравномерной (б) нагрузками

Если двигатель работает в продолжительном режиме с неравномерной нагрузкой, то его мощность можно определить двумя методами: эквивалентных величин или средних потерь.

Метод эквивалентных величин. Используя этот метод, по нагрузочной

диаграмме находят эквивалентную мощность $P_{\text{экв}}$. Если двигатель будет иметь номинальную мощность $P_{\text{ном}} = P_{\text{экв}}$, то в некоторые отрезки времени он будет работать с недогрузкой и охлаждаться, а в другие с перегрузкой и нагреваться. Но ни в один момент времени температура двигателя не будет превышать допустимого значения для данного класса изоляции. Эквивалентная мощность

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)},$$

причем суммирование следует производить за время $t = 4T_n$, в течение которого сглаживается влияние начальной температуры.

Нагрузочную диаграмму можно задать в виде зависимости момента на валу двигателя или тока от времени, тогда определяют эквивалентный момент или ток:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{(M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)}$$

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)}.$$

Метод средних потерь. Он более точен, но и более трудоемок, чем метод эквивалентных величин. Его целесообразно применять для двигателей, условия вентиляции которых изменяются при изменении нагрузки. К ним относятся самовентилирующиеся двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, имеющие мягкую механическую характеристику, и двигатели с регулировкой скорости, у которых вентилятор насажен на вал двигателя и охлаждение зависит от скорости.

Средняя мощность за время $t = 4T_n$

$$P_{\text{ср}} = (P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n).$$

По этой формуле выбирают двигатель из условия $P_n \geq P_{\text{ср}}$ и определяют

потери:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}}, \Delta P_1 = P_1(1 - \eta_1)/\eta_1, \text{ и т. д.}$$

Средние потери находят по формуле

$$\Delta P_{\text{ср}} = (\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n).$$

и сравнивают их с номинальными. Если $P_{\text{ном}} > \Delta P_{\text{ср}}$ на 10-15%, то выбранный по каталогу двигатель подходит для работы, так как он будет нагреваться так же или чуть меньше, чем при номинальной нагрузке. Если же $\Delta P_{\text{ном}} < \Delta P_{\text{ср}}$, то выбирают другой двигатель, больший по мощности.

Рассмотренные методы применяют для температуры окружающей среды, равной расчетной, например $T_{\text{окр}} = 40^\circ \text{C}$. Если $T_{\text{окр}} < 40^\circ \text{C}$, то условия охлаждения улучшаются, что позволяет несколько перегрузить двигатель без ущерба для его изоляции. Наоборот, работая в горячем цехе (на горячем воздухе или в дыму), необходимо снизить нагрузку относительно номинальной. Определить допустимые перегрузки при отклонении температуры окружающей среды от расчетной можно графическим методом.

Пример 9.1. Дана нагрузочная диаграмма и соответствующие ей данные (см. п. 3, с. 139). Подобрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, если синхронная частота вращения $n_1 = 1500 \text{ об/мин}$, температура $T_{\text{окр}} = 25^\circ \text{C}$. Задачу решить двумя методами.

Решение. Заменяв плавную кривую ступенчатой, определяем мощность P и время t каждого участка (рис. 9.2,6).

Метод эквивалентных величин. 1. Эквивалентную мощность определяем по формуле (9.3):

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_{11}^2 t_{11}) / (t_1 + t_2 + \dots + t_{11})} =$$

$$\sqrt{(2,7^2 \cdot 10 + 2,4^2 \cdot 10 + \dots + 2,6^2 \cdot 15) / (10 + 10 + \dots + 15)} = 3,88 \text{ кВт}$$

2. По каталогу 01.40.04-80 (табл. 9.2) выбираем двигатель серии 4А100L4ПУЗ мощностью 4 кВт, $n_{\text{ном}} = 1430$ об/мин; $\eta_{\text{н}} = 84\%$;
 $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 2,4$; $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}} = 6$, $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}} = 2$, $I_1 = 8,6 \text{ А}$, $U = 380 \text{ В}$,
 $\cos \varphi = 0,84$, класс изоляции В.

3. Частоту вращения n_5 при наибольшей нагрузке P_5 определяем из условия, что механическая характеристика прямолинейна (рис. 9.3). Для этого составляем пропорцию и решаем ее относительно n_5 :

$$(n_1 - n_{\text{ном}}) / (n_1 - n_5) = P_{\text{ном}} / P_5 \text{ или}$$

$$n_5 = n_1 - P_5 (n_1 - n_{\text{ном}}) / P_{\text{ном}} = 1500 - 6500(1500 - 1430) / 4000 = 1386 \text{ об/мин}$$

где n_1 – частота вращения поля статора, об/мин.

4. Для проверки на перегрузочную способность определяем номинальный $M_{\text{ном}}$ и наибольший $M_{\text{наиб}}$ моменты:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 4000 / 1430 = 26,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{ном}} = M_5 = 9,55 P_5 / n_5 = 9,55 \cdot 6500 / 1386 = 44,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Сравниваем перегрузку и перегрузочную способность:

$$M_5 / M_{\text{ном}} = 44,8 / 26,7 = 1,67 < M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}} = 2,4$$

т. е. выбранный по каталогу двигатель подходит для работы.

Рис. 9.3 Характеристики для двигателя 4А100L4ПУЗ: $1-\eta=f(P_2)$;

$$2 - n = f(P_2)$$

Метод средних потерь. 1. Среднюю мощность определяем по формуле (9.6):

$$P_{cp} = (P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_{11} t_{11}) / (t_1 + t_2 + \dots + t_{11}) =$$

$$(2,7 \cdot 10 + 2,4 \cdot 10 + \dots + 2,6 \cdot 15) / (10 + 10 + \dots 15) = 3,57 \kappa B m$$

2. По каталогу 01.40.04-80 (табл. 9.2) предварительно выбираем двигатель 4A100L4ПУЗ мощностью $P_{\text{ном}} = 4\text{кВт}$ и определяем его номинальные потери по (9.7):

$$\Delta P_{\text{HOM}} = P_{\text{HOM}}(1 - \eta_{\text{HOM}})/\eta_{\text{HOM}} = 4(1 - 0,84)/0,84 = 0,762 \text{ kBT}.$$

Таблица 9.2

Тип двигателя	$P_{\text{ном}},$ кВт	$n,$ об/мин	I_1, A при $U=38$ 0В	$\eta,$ %	$\cos\varphi$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$
------------------	--------------------------	----------------	---------------------------------	--------------	---------------	--	--	---	--

Закрытые обдуваемые двигатели. Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
4A63B2ПУЗ	0,5	2740	1,3	73,0	0,86	4,5	2,0	1,5	2,2
4A71A2ПУЗ	0,7	2840	1,7	77,0	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2
4A71B2ПУЗ	1,1	2810	2,5	77,5	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2
4A80A2ПУЗ	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,1	1,4	2,6
4A80B2ПУЗ	2,2	2850	4,7	83,0	0,87	6,5	2,1	1,4	2,6
4A90L2ПУЗ	3,0	2840	6,1	84,5	0,88	6,5	2,1	1,6	2,5
4A1100S2ПУЗ	4,0	2880	7,8	86,5	0,89	7,5	2,0	1,6	2,5
4A100L2ПУЗ	5,5	2880	10,5	87,5	0,91	7,5	2,0	1,6	2,5
4A112M2ПУЗ	7,5	2900	14,9	87,5	0,88	7,5	2,0	1,8	2,8
4A132M2ПУЗ	11,0	2900	21,2	88,0	0,90	7,5	1,7	1,5	2,8

Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
4A71A4ПУЗ	0,5	1390	1,7	70,5	0,70	4,5	2,0	1,8	2,2
4A71B4ПУЗ	0,7	1390	2,2	72,0	0,73	4,5	2,0	1,8	2,2
4A80A4ПУЗ	1,1	1420	2,8	75,0	0,81	5,0	2,0	1,6	2,2
4A80B4ПУЗ	1,5	1415	3,6	77,0	0,83	5,0	2,0	1,6	2,2
4A90L4ПУЗ	2,2	1425	5,0	80,0	0,83	6,0	2,1	1,6	2,4
4A100S4ПУЗ	3,0	1435	6,7	82,0	0,83	6,0	2,0	1,6	2,4
4A100L4ПУЗ	4,0	1430	8,6	84,0	0,84	6,0	2,0	1,6	2,4
4A112M4ПУЗ	5,5	1445	11,5	85,5	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2
4A132S4ПУЗ	7,5	1455	11,1	87,5	0,86	7,5	2,2	1,7	3,0
4A132M4ПУЗ	11,0	1460	22,0	87,5	0,87	7,5	2,2	1,7	3,0
Синхронная частота вращения 750 об/мин									
4A90LA8ПУЗ	0,7	700	2,7	68,0	0,62	3,5	1,6	1,4	1,9
4A90LB8ПУЗ	1,1	700	3,5	70,0	0,68	3,5	1,6	1,4	1,9
4A100L8ПУЗ	1,5	700	4,7	74,0	0,65	4,0	1,6	1,3	1,9

4A112MA8ПУЗ	2,2	700	6,2	76,5	0,71	5,0	1,9	1,5	2,2
4A112MB8ПУЗ	3,0	700	7,8	79,0	0,74	5,0	1,9	1,5	2,2
4A132S8ПУЗ	4,0	720	10,3	83,0	0,70	5,5	1,9	1,7	2,6
4A132M8ПУЗ	5,5	720	13,6	83,0	0,74	5,5	1,9	1,7	2,6
4A160S8ПУЗ	7,5	720	17,7	83,0	0,75	6,0	1,4	1,0	2,2

3. По кривой 1 (рис. 9.3) определяем потери для каждого участка:

$$\Delta P_1 = P_1(1 - \eta_1)/\eta_1 = 2,7(1 - 0,845)/0,845 = 0,49 \text{ кВт} \text{ и т.д.}$$

Ниже даны результаты расчетов для участков 1-11:

Номер участка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P, кВт	2,7	2,4	3,3	5,5	6,5	5,2	3,7	2,4	1,5	2,5	2,6
t, мин	10	10	20	13	16	14	16	20	13	5	15
η , %	84,5	84,5	84,5	78	73	80	84	84,5	82	84,5	84,5
ΔP , кВт	0,49	0,44	0,60	1,55	2,40	1,30	0,70	0,44	0,33	0,46	0,47

5. Средние потери [см. (9.8)]:

$$\Delta P = (\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_{11} t_{11}) / (t_1 + t_2 + \dots + t_{11}) =$$

$$(0,495 \cdot 10 + 0,44 \cdot 10 + \dots + 0,477 \cdot 15) / (10 + 10 + \dots + 15) = 0,89 \text{ кВт}$$

5. Сравниваем средние потери с номинальными и видим, что $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$. Коэффициент перегрузки $\lambda = \Delta P_{\text{ср}} / \Delta P_{\text{ном}} = 0,89 / 0,762 = 1,168$, что составляет 16,8%. Такая перегрузка недопустима, если двигатель работает при $T_{\text{окр}} = 40^\circ \text{C}$, но по условию $T_{\text{окр}} = 25^\circ \text{C}$.

Рис. 9.4. График для определения допустимой перегрузки к примеру 9.1

Пересчет допустимой нагрузки при пониженной температуре

$T_{окр}$. 1. Построим график на основании расчета $\Delta P = f(P)$ (рис. 9.4).

2. Проведем прямую $T_{окр} = f(\Delta P)$ через две точки:

$$a(T_{окр} = 40^0 C, \Delta P = 0) \text{ и } б(T_{окр} = 135^0 C(\text{класс В}), \Delta P_{ном} = 0,762 \text{ кВт}).$$

3. Проведем линию $вг$, параллельную $аб$, через точку

$$в(T_{окр} = 25^0 C, \Delta P = 0). \text{ Абсцисса точки } г: T_{окр} = 135^0 C$$

4. Спроецируем точку $г$ на кривую $\Delta P = f(P)$, а затем полученную точку $д$ - на горизонтальную ось. Получим допустимую мощность $P_{доп} = 4,25$ кВт. Таким образом, выбранный двигатель годится для работы.

5. Коэффициент допустимой перегрузки

$$\lambda_{доп} = P_{доп} / P_{ном} = 4,25 / 4 = 1,06, \text{ т. е. двигатель может быть перегружен на } 6\%.$$

ЗАДАНИЕ 9.1. Выбор двигателя для продолжительного режима.

Нагрузочные диаграммы заданы в табл. 9.3, где указаны мощность и вре-

мя участков для шести вариантов. Выбрать асинхронный двигатель серии 4А (см. табл. 9.2) с синхронной частотой вращения $n = 1500$ об/мин, если $T_{окр} = 25^{\circ}\text{C}$. Задачу решить методом эквивалентных величин.

Таблица 9.3

Номер участка	Р _{ном} для вариантов, кВт						t для вариантов, мин					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2,5	3,1	7,0	2,1	10,0	14,0	14	14	10	4	16	8
2	3,1	0,5	14,0	6,0	2,1	21,0	2	7	6	15	9	20
3	5,6	1,7	8,1	5,3	19,0	4,5	3	2	8	3	3	5
4	2,4	5,0	10,9	8,7	7,0	9,5	19	11	5	8	12	13
5	6,5	14,0	0,5	16,0	14,0	6,6	23	4	3	12	7	16
6	1,3	10,0	9,3	0,7	2,6	0,8	12	16	6	15	11	4
7	2,7	4,2	5,4	10,5	8,1	3,0	19	5	12	3	4	17
8	3,7	8,7	2,1	8,0	13,0	10,5	14	24	22	10	8	4
9	0,7	6,5	4,9	11,7	4,3	12,4	4	17	13	6	2	7
10	2,4	5,1	3,6	2,2	0,8	17,0	20	18	2	8	12	2
11	5,2	5,1	2,1	3,9	11,0	19,0	8	15	11	10	6	17

6 СОДЕРЖАНИЕ ТЕКСТОВОЙ ЧАСТИ

К текстовому документу в курсовом проекте относится пояснительная записка, в которой материал располагается в следующем порядке; титульный лист, задание на проектирование, содержание, введение, основная часть, заключение, список использованных источников, приложение.

6.1. Титульный лист является первым листом пояснительной записки (приложение 2).

6.2. Задание является вторым листом пояснительной записки (приложение 3).

6.3. Содержание оформляется после того, как работа над текстовым документом закончена. Содержание помещается перед введением.

6.4. Введение предназначено для обоснования важности и актуальности темы, в нем формулируется главная задача работы. Текст введения должен содержать информацию о современном состоянии рассматриваемого вопроса, о перспективах и путях его решения.

6.5. Основная часть включает следующие разделы:

6.5.1. Характеристика объекта управления – краткое описание технологического оборудования и основные характеристики проектируемого объекта, сведения о применяемых электродвигателях.

6.5.2. Основные решения по управлению технологическим объектом, автоматизированном электроприводе, раскрывающих задачи, решаемые системами автоматического и дистанционного управления. Здесь же приводятся описания принятой структуры управления технологическим агрегатом и принципиальной схемы управления. В разделе приводится обоснование выбора средств управления с учетом условий эксплуатации, метрологических данных, быстрого действия, надежности.

6.5.3. Расчет механических характеристик электродвигателей независимого и параллельного возбуждения, расчет пусковых сопротивлений электродвигателей независимого и параллельного возбуждения, расчет механических характеристик асинхронного двигателя, расчет пусковых и тормозных резисторов асинхронных электродвигателей, переходные режимы при нелинейной совместной характеристике, выбор мощности электродвигателя для продолжительного режима работы.

6.5.4. Заказные спецификации средств управления, составляемые по принципиальным схемам. Заказные спецификации составляется на листах формата А4 (приложение 4).

6.5.5. Пояснения к графической части проекта должны содержать сведения, не имеющиеся на чертежах и схемах проекта. В пояснениях приводится описание работы системы управления, полные технические характеристики выбранных средств управления и автоматизации.

6.6. Заключение содержит выводы, сделанные на основании выполненной работы. В нем дается оценка полученных результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: Учебник для вузов. / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб.: Питер, 2008. – 320с.
2. Гольдберг, О.Д. Электромеханика [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. завед. / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Д.Гольдберга. – М.: Издательский центр «Акадкмия», 2007 – 512 с.
3. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст]: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

Дополнительная литература

1. Поляков, С.И. Электромеханические системы [Текст]: учеб. пособие / С.И.Поляков; Фед. агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования, Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2005. – 159 с.
2. Справочник по автоматизированному электроприводу [Текст] / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоиздат, 1983. – 616 с.
3. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода [Текст] / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
4. Зимин, Е.Н. Автоматическое управления электроприводами [Текст] / Е.Н. Зимин, В.И. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1979. – 318 с.
5. Иванченко, Г.Е. Электрооборудование в строительстве [Текст] / Г.Е.Иванченко – М.: Высшая школа, 1986. – 176 с.
6. Цейтлин, Л.С. Электропривод, электрооборудование и основы управления [Текст] , Л.С. Цейтлин – М.: Высшая школа, 1985. – 192 с.
7. Москаленко, В.В. Автоматизированный электропривод [Текст] / В.В. Москаленко – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
8. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины [Текст] / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
9. Хрущев, В.В. Электрические машины систем автоматики [Текст] / В.В. Хрущев – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.
- 10.Кацман, М.М. Электромеханические машины и электропривод автоматических устройств [Текст] / М.М. Кацман – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
- 11.Поляков, С.И. Электромеханические системы [Текст]: Метод. указ. к выполнению лабораторных работ для студентов спец. 210214 – АТП и П (ЛК). Часть 1 / С.И. Поляков, Д.А. Лебедев – Воронеж: ВГЛТА, 1997. – 40 с.

12. Поляков, С.И. Электромеханические системы [Текст]: Метод. указ. к выполнению лабораторных работ для студентов спец. 210214 – АТП и П (ЛК). Часть 2 / С.И. Поляков, Д.А. Лебедев – Воронеж: ВГЛТА, 1997. – 38 с.
13. Поляков, С.И. Электромеханические системы [Текст]: Метод. указ. к выполнению лабораторных работ для студентов спец. 220300 – АТП и П (ЛК) / С.И. Поляков – Воронеж: ВГЛТА, 2007. – 24 с.

Приложение 1

Форма и пример заполнения перечня приборов и аппаратов

Обозначение	Наименование и техническая характеристика	Тип	К-во	№ установочного чертежа	Примечание
1-6	Реле промежуточное, 220В, 2з2р	МКУ-48	6	ТКУ-1772	69
8	Трансформатор 220/36В, 10ВА	ТБСЗ-01	1	ТКУ-1991	69
9	Выключатель пакетный двухполюсный 220, 25А	ПВМ2-25	1	-	
10	Резистор постоянный 7,5Вт, 12000м	ПЭ-7,5	5	-	
11	Лампа накаливания 220В, 25Вт	-	1	-	

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Воронежская государственная лесотехническая академия

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту по
электроприводу и электромеханическим системам

АСУ ТП ДЛЯ УЧАСТКА ПРЕССОВАНИЯ
ДСТП В ОАО «ВОЛГОГРАДМЕБЕЛЬ»

Работу выполнил
студент гр. 123 Иванов И.И.

Руководитель проекта
доцент каф. АПП Петров П.П.

Воронеж, 2008

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный лесотехнический университет
им. Г.Ф. Морозова»

Факультет механический

Кафедра автоматизации производственных процессов

Дисциплина «Электропривод и электромеханические системы»

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект

Вариант 1

Тема: **Автоматизированный электропривод приготовления
связующего в производстве ДСтП**

Студент Бурсов А.Ю. Группа АП2-131-ОБ

Дата выдачи « 8 » октября 2015 г.

Срок выполнения « 25 » декабря 2015 г.

Руководитель

доц., канд. техн. наук Поляков С.И.
должность, уч. степень, Ф.И.О.

1. Перечень графического материала

2 листа формата А1, включает принципиальную схему управления и иллюстрацию расчетной части в виде графиков механических характеристик и переходных процессов

2. Перечень вопросов, которые должны быть отражены в пояснительной записке

Введение

1. Краткий анализ типов и видов электродвигателей, применяемых в деревообработке (анализ литературных источников)
2. Расчетная часть в соответствии с требованиями методических указаний
3. Механические, статические и динамические характеристики электродвигателя (анализ литературных источников и по результатам расчетов по методическим указаниям)
4. Описание переработанной принципиальной схемы управления из учебника (по указанию преподавателя). Разработка принципиальной схемы управления типовым электроприводом на базе современного КТС (микроконтроллеров, частотных преобразователей, интеллектуальных реле и т.п.)
5. Выбор электрооборудования для проектируемого электропривода.

Библиографический список.

Рекомендуемая литература

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: Учебник для вузов. / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб.: Питер, 2008. – 320с.
2. Гольдберг, О.Д. Электромеханика [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. завед. / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Д.Гольдберга. – М.: Издательский центр «Академия», 2007 – 512 с.
3. Поляков, С.И. Электромеханические системы [Текст]: учеб. пособие / С.И.Поляков; Фед. агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования, Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2005. – 159 с. – Электронная версия в ЭБС ВГЛТА.
4. Поляков, С. И. Электропривод и электромеханические системы [Электронный ресурс]: метод. указания к выполнению и оформлению курсового проекта для студентов спец. 220301 – АТП и П / С. И. Поляков; ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – Электронная версия в ЭБС ВГЛТА.
5. Петровский, В.С. Автоматизация технологических процессов и производств в деревообрабатывающей отрасли [Текст]: учеб. / В.С. Петровский, А.Д. Данилов. – Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2010. – 432 с.

Руководитель

подпись

Задание принял к исполнению

подпись

Приложение 4

УТВЕРЖДАЮ

Воронежская государственная
лесотехническая академия
Кафедра АПП
Предприятие _____

Объект _____

ЗАКАЗНАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ
НА СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ И КОММУТАЦИИ

Позиция по принципиальной схеме управления	Наименование и техническая характеристика средств автоматизации, приборов, средств коммутации, релейно-контактной автоматики	Тип и марка приборов, аппаратов, средств управления	Предприятие, фирма-изготовитель	Ед. измерения		Потребность по проекту	Цена единицы, руб.	Стоимость, тыс. руб.
				Наименование	Код			
1	2	3	4	5	6	7	8	9

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Общие сведения.....	4
2 Организация проектирования	4
3 Содержание графической части	4
3.1 Принципиальные схемы управления.	
Общие положения и указания.....	4
3.2 Состав и компоновка чертежа схемы.....	5
3.3 Компоновка чертежа схемы	6
4 Оформление основной надписи.....	7
5 Расчетная часть проекта	8
5.1 Механические характеристики электродвигателей независимого и параллельного возбуждения	8
5.2 Расчет пусковых сопротивлений электродвигателей независимого и параллельного возбуждения.....	11
5.3 Расчет механических характеристик асинхронного двигателя	15
5.4 Расчет пусковых и тормозных резисторов асинхронных электродвигателей.....	19
5.5 Переходные режимы при нелинейной совместной характеристике	22
5.6 Выбор мощности электродвигателя для продолжитель- ного режима работы.....	36
6 Содержание текстовой части	45
Библиографический список.....	46
Приложение	47

Поляков Сергей Иванович

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Методические указания к выполнению и оформлению курсового проекта для студентов по направлению подготовки 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств (уровень бакалавриата)

Подписано в печать . Формат 60x84 /16. Объем п. л.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». УОП ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394613, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8