

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель и задачи курса

Электромеханические преобразователи энергии составляют основное оборудование при электрификации и автоматизации технологических процессов, как в промышленности, так и в сельском хозяйстве.

Цель дисциплины: формирование у студентов теоретической базы по современным электромеханическим преобразователям энергии, которая позволит им успешно решать теоретические и практические задачи в их профессиональной деятельности.

Задачи дисциплины: знакомство с конструкцией и принципом действия электрических машин и трансформаторов, изучение физической сущности процессов, происходящих при различных режимах работы, особенностей различного рода электрических машин, трансформаторов и их эксплуатационных свойств.

Дисциплина входит в обязательный перечень специальных дисциплин Федерального Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 35.03.06 (110800) – «Агроинженерия» (квалификация «бакалавр»), и в соответствии со стандартом должна обеспечивать основные требования к подготовке бакалавра по профилю «Электрооборудование и электротехнологии в АПК» (профессиональный цикл (БЗ.В05), вариативная часть).

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих **профессиональных компетенций:**

- готовность к профессиональной эксплуатации машин и технологического оборудования для производства, хранения и первичной переработки сельскохозяйственной продукции;
- способность использовать современные методы монтажа, наладки машин и установок, поддержания режимов работы электрифицированных и автоматизированных

технологических процессов, непосредственно связанных с биологическими объектами;

- готовность изучать и использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследований;

- готовность к участию в проведении исследований рабочих и технологических процессов машин.

В результате изучения дисциплины ***студент должен знать:***

- значение электрических машин для электрификации и автоматизации сельского хозяйства;

- общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии;

- конструктивные исполнения, параметры и режимы работы электрических машин, основные характеристики электрических двигателей, генераторов и преобразователей, эксплуатационные требования к ним;

- тенденции развития электрических машин.

Студент должен уметь:

- подключать и испытывать электрические машины и трансформаторы;

- рассчитывать, измерять и анализировать параметры и основные характеристики электрических машин и трансформаторов применительно к потребностям агропромышленного комплекса;

- самостоятельно решать задачи, возникающие в процессе эксплуатации электромеханических преобразователей энергии.

Студент должен обладать навыками расчета и выбора электрических машин и трансформаторов для реализации технологий сельскохозяйственного производства.

Студент-заочник в межсессионный период изучает дисциплину согласно учебному плану и выполняет контрольную работу. На сессии студенты слушают лекции, выполняют лабораторные работы, получают необходимые консультации и сдают зачёт и экзамен.

Методические указания по изучению дисциплины и задание на выполнение контрольной работы выдаются каждому студенту индивидуально.

При появлении затруднений при изучении теоретического курса и выполнении контрольных работ студенты должны обращаться за консультацией на кафедру электрификации сельского хозяйства (тел. 253-63-02) или лично к преподавателю (e-mail: n.pribylova@mail.ru).

1.2. Библиографический список

Основная литература:

№ п/п	Автор	Заглавие	Гриф издания	Издательство	Год издания	Кол-во экз. в библиот.
1.	Епифанов, А.П.	Электрические машины	УМО	М.: изд. Лань	2006	Электронный ресурс
2.	Встовский, А.Л.	Электрические машины	ГОУ ВПО МЭИ	М.: СФУ	2013	Электронный ресурс
3.	Усольцев, А.А.	Электрические машины		СПбНИУ ИТМО	2013	Электронный ресурс
4.	Копылов, И.П.	Электрические машины. Учебник для бакалавров	УМО	М.: изд. Юрайт	2012	Оформлена заявка

Дополнительная литература:

№ п/п	Автор	Заглавие	Издательство	Год издания
1.	Копылов, И.П.	Электрические машины	М.: Высш. шк.	2004
2.	Скорняков, В.А.	Электрические машины (электронный ресурс)	СПбГЛТУ	2012
3.	Филимонов, С.Г.	Электромеханика (электронный ресурс)	КузГТУ	2010
4.	Алиев, И.И.	Электрические машины: учебно-справочное пособие	М.: изд. РадиоСофт	2011

1.3. Распределение учебного времени для изучения содержания курса

Т а б л и ц а 1.1

№ п/п	Раздел дисциплины	Объём в часах					
		Лекции		ЛР		СР	
		заоч. сокр	заоч. сокр	заоч. сокр	заоч. сокр	заоч. сокр	заоч. сокр
1	2	3		4		5	
1.	<u>Трансформаторы.</u> Назначение, области применения, принцип действия и устройство. Основные уравнения, схема замещения и векторная диаграмма. Опытное определение параметров трансформатора. Изменение напряжения и внешние характеристики. Энергетическая диаграмма, потери и КПД. Группы соединений обмоток. Параллельная работа трансформаторов. Специальные трансформаторы.	4	2	4	2	30	34
2.	<u>Асинхронные машины.</u> Общие свойства машин переменного тока. Обмотки машин переменного тока. ЭДС и МДС обмоток. Устройство и принцип действия АД с короткозамкнутым и фазным ротором. Режимы работы. Основные процессы и уравнения, схема замещения, векторная диаграмма. Энергетическая диаграмма, потери и КПД. Электромагнитный момент и механическая характеристика. Рабочие характеристики. Способы пуска и регулирования частоты вращения АД. Однофазные и конденсаторные АД. Основные типы серийно выпускаемых АД.	4	2	4	4	30	34

Продолжение табл. 1.1

1	2	3		4		5	
3.	<u>Синхронные машины.</u> Устройство и принцип действия. Магнитное поле синхронной машины. Уравнения напряжений СГ. Реакция якоря. Векторные диаграммы. Характеристики СГ. Параллельная работа СГ. Регулирование активной и реактивной мощностей. Синхронный двигатель и синхронный компенсатор.	2	-	2	2	30	32
4.	<u>Машины постоянного тока.</u> Принцип действия и основные элементы конструкции. Якорные обмотки МПТ. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент вращения. Магнитная цепь, реакция якоря. Коммутация и средства её улучшения. Генераторы постоянного тока: классификация и характеристики. Двигатели постоянного тока: рабочие и механические характеристики, способы пуска и регулирования частоты вращения. Универсальный коллекторный двигатель. Нагревание и охлаждение электрических машин.	2	-	2	2	30	30
ИТОГО:		144					

2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ И УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

№ варианта выдаёт ведущий преподаватель в соответствии с порядковым номером студента в общем списке.

2.1. Методические указания к решению задач

Целью контрольной работы (КР) является закрепление теоретических знаний о физических процессах, протекающих в

электромеханических преобразователях энергии, приобретение студентами необходимых навыков по определению основных параметров и построению нагрузочных и механических характеристик электрических машин, необходимых для их правильного выбора и эксплуатации.

КР состоит из семи задач по следующим разделам курса: трёхфазные трансформаторы (задача № 1); асинхронные двигатели (задачи № 2, № 3); машины постоянного тока (задачи № 4, № 5); синхронные генераторы (задачи №6, №7).

2.1.1. Прежде чем приступить к выполнению задачи по трансформатору, необходимо изучить теоретический материал по этой теме.

В паспорте трёхфазных трансформаторов даются номинальная мощность и номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток.

Номинальная мощность трансформатора – это такая полная мощность (В·А), которую он может отдавать длительно, нагреваясь при этом до допустимой температуры:

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_{2H} I_{2H}. \quad (2.1)$$

Под номинальными напряжениями понимают линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода (сокращённо – х. х.), а под номинальными токами – линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

В трансформаторах средней мощности, данные для которых приведены в условиях задач, можно пренебречь током х. х. в номинальном режиме вследствие его малости ($I_0 \approx 0$) и считать, что

$$S_H \approx \sqrt{3} \cdot U_{1H} I_{1H}. \quad (2.2)$$

Для удобства и упрощения расчётов величины вторичной обмотки приводят к числу витков первичной обмотки:

$$U'_2 = nU_2; \quad I'_2 = \frac{I_2}{n}; \quad R'_2 = n^2R_2; \quad X'_2 = n^2X_2; \quad Z'_2 = n^2Z_2, \quad (2.3)$$

где n – коэффициент трансформации.

Трансформатор в этом случае называется приведённым.

Работа приведенного трансформатора описывается тремя уравнениями:

– уравнением напряжений для первичной цепи трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1; \quad (2.4)$$

– уравнением напряжений для вторичной цепи трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_2 \dot{I}_2; \quad (2.5)$$

– уравнением токов трансформатора:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = I_0. \quad (2.6)$$

Кроме номинальных значений мощности, напряжений, частоты, в паспорт трансформатора записывают ряд параметров, определяемых опытным путём, которые называют параметрами в режиме х. х. и в режиме короткого замыкания (сокращённо к. з.).

Параметры х. х. – это относительное значение тока I_0 в процентах от $I_{н}$ и мощность потерь в магнитопроводе P_0 , измеренные при $U_{1н}$. Параметры к. з. – это напряжение U_k в процентах от $U_{1н}$ и мощность потерь в обмотках P_k при $I_{1н}$, $I_{2н}$. Причём в паспорте даются мощности потерь всех трёх фаз. Используя эти параметры, можно определить все эксплуатационные характеристики трансформатора: диапазон колебания напряжения на приемнике при изменении тока в нём, наибольший возможный ток при к. з., потери энергии и т. д.

Группы соединений $Y/Y_0 - 0$ или $Y/\Delta - 11$ (звезда – звезда с нейтральным проводом, группа 0; звезда – треугольник, группа 11) характеризуют схему соединения обмоток и угловое смещение векторов линейных ЭДС обмоток низкого напряжения по отношению к векторам линейных ЭДС обмоток высокого напряжения.

Векторную диаграмму строят на основании уравнений (2.4)...(2.6). Она позволяет наглядно представить соотношения и углы сдвига фаз между токами, ЭДС и напряжениями трансформатора.

2.1.2. Изучение асинхронного двигателя (АД) надо начинать с его устройства и принципа работы, необходимо понять условия возникновения вращающегося магнитного поля.

Двигатели серий 5А и АИР с короткозамкнутым ротором предназначены для включения в трёхфазную сеть напряжением 380/220 В, имеют обмотки статора, каждая фаза которых рассчитана на 220 В, т. е. $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$.

Механическая характеристика АД $M = f(s)$ может быть построена по расчётной формуле вращающего (электромагнитного) момента:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\text{ф}}^2 R'_2}{\omega_1 s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}, \quad (2.7)$$

где M – вращающий момент двигателя, Н·м; $U_{1\text{ф}}$ – фазное напряжение статорной обмотки; s – скольжение; R_1, X_1 – значения сопротивлений статорной обмотки; R'_2, X'_2 – приведённые значения сопротивлений роторной обмотки; f_1 – частота напряжения питания; $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ – угловая скорость вращения магнитного поля, p – число пар полюсов.

Для двигателей средней мощности (от 7,5 до 55 кВт), которые предлагаются в вариантах задач, можно считать вращающий момент равным полезному моменту на валу в виду незначительных механических потерь.

Уравнение (2.7) представляет собой довольно сложную зависимость. Для упрощения расчётов пусковых и регулировочных сопротивлений асинхронных двигателей можно пренебречь значением активного сопротивления обмотки статора, приняв $R_1 = 0$. В таком случае выражение (2.7) преобразуется в широко распространённую формулу Клосса для приближённого расчёта механической характеристики (см. далее).

2.1.4. При изучении машин постоянного тока (МПТ), следует уяснить принцип обратимости применительно к МПТ, приняв во внимание роль противодействующего и вращающего моментов, напряжения и ЭДС машины:

$$- \text{ для двигательного режима } U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (2.8)$$

$$- \text{ для генераторного режима } E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (2.9)$$

В паспортных данных двигателя постоянного тока (ДПТ) приводятся сопротивления его обмоток. Внутреннее сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ состоит из сопротивления обмотки якоря $R_{\text{а}}$, щёток $R_{\text{щ}}$ ($R_{\text{щ}} \approx 0$) и обмотки дополнительных полюсов $R_{\text{дп}}$, т. к. она включается последовательно с обмоткой якоря.

Характеристики ДПТ зависят от схемы включения обмотки возбуждения (ОВ) по отношению к обмотке якоря (ОЯ). В задании обмотка возбуждения с сопротивлением $R_{\text{в}}$ подключается к независимому регулируемому источнику питания (ДПТ с независимым возбуждением).

ДПТ с независимым возбуждением обладает жесткой механической характеристикой, описываемой уравнением:

$$n = n_0 - bM, \quad (2.10)$$

где n_0 – частота вращения идеального х. х.; b – постоянная величина.

Это уравнение соответствует допущению, что магнитный поток остаётся неизменным при разных нагрузках. Однако при увеличении нагрузки вследствие реакции якоря магнитное поле уменьшается. Но, если реакцией якоря пренебречь ввиду её малости или если реакция якоря компенсируется, механическую характеристику можно считать прямолинейной.

Полезный момент на валу двигателя M меньше электромагнитного $M_{\text{э}}$ не величину момента х. х. M_0 , создаваемого всеми видами потерь в двигателе: трением щеток, подшипников, вентиляционными потерями и потерями в стали якоря на перемагничивание. Для двигателей небольшой мощности (от 1,6 до 7,5 кВт), паспортные данные которых предложены в задании, пренебречь величиной M_0 , как в случае АД, нельзя, т. к. величина этих потерь у МПТ значительна.

Поскольку ДПТ допускает плавное регулирование частоты вращения, возникает вопрос о диапазоне регулирования. Возможность расширения диапазона регулирования ограничена максимальной частотой вращения n_{max} , т. к. увеличение частоты вращения приводит к ухудшению условий коммутации, а её

уменьшение вызывает увеличение размеров двигателя и, как следствие, – удорожание. Поэтому обычно $n_{\max}/n_{\min} = 3 \div 5$.

2.2. Требования к выполнению и оформлению контрольных работ

2.2.1. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой должны быть указаны: название дисциплины, вариант, фамилия и инициалы студента, шифр и номер группы. На каждой странице нужно оставлять поля шириной 2–3 см для замечаний преподавателя.

2.2.2. Расчёты рекомендуется выполнять до трех или четырех значащих цифр. Промежуточные расчёты, если они сравнительно невелики, можно опускать.

2.2.3. Графики и векторные диаграммы выполняются на миллиметровой бумаге. Допускается выполнение их на белой бумаге после первого упоминания в тексте, при этом обязательно наличие координатной сетки. Векторные диаграммы строят в масштабе, который указывают в правом углу диаграммы по типу: $m_U = \dots \text{В/мм}$, $m_I = \dots \text{А/мм}$.

2.2.4. В конце работы обязательна подпись студента и дата выполнения. Если работа не зачтена, то необходимые исправления делаются в той же тетради после замечаний преподавателя. Если не остаётся места для исправлений и дополнений, они выполняются на подклеенных листах.

2.2.5. Расчёт рекомендуется проводить с использованием ЭВМ.

2.2.6. Работы, выполненные не по своему варианту, в неполном объёме или небрежно оформленные, на проверку не принимаются.

2.3. Задания для контрольной работы

Задача № 1. Используя технические данные трёхфазных силовых трансформаторов, приведённые в табл. 2.1, рассчитать: 1) фазные напряжения обмоток при х. х.; 2) фазные и линейные коэффициенты трансформации; 3) номинальные токи в

обмотках; 4) активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток, полагая $R_1 = R'_2$ и $X_1 = X'_2$; 5) коэффициент мощности в режиме х. х. и угол потерь в стали (угол магнитного запаздывания); 6) изменение вторичного напряжения и КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$ для $\cos\varphi_2 = 1,0$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ (нагрузка активно-индуктивная, $\varphi_2 > 0$); 7) нагрузку β_{\max} , при которой КПД достигает максимального значения; 8) токи аварийного к. з. и кратность их по отношению к номинальным токам; 9) реактивную мощность, необходимую для образования магнитного поля рассеяния первичной и вторичной обмоток. Построить внешние характеристики $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$, векторную диаграмму и T-образную схему замещения для $\beta = 0,8$, $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Т а б л и ц а 2.1 – Технические данные трёхфазных двухобмоточных трансформаторов

№ варианта	Тип	Мощность $S_{\text{ном}}$, кВА	Напряжение, кВ		Потери, кВт, при х.х. и к.з.		Ток холостого хода, I_0 , %	Напряжение к. з., U_k , %	Группа соединения обмоток
			$U_{1\text{ном}}$	$U_{2\text{ном}}$	P_0	P_k			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ТМ–25/6	25	6,3	0,4	0,12	0,65	3,2	4,5	Y/Y ₀ -0
2	ТМ–40/6	40	6,3	0,23	0,24	0,88	4,5	4,5	Y/Y ₀ -0
3	ТМ–63/10	63	10	0,4	0,22	1,45	2,8	4,7	Y/Y ₀ -0
4	ТМ–100/6	100	6,3	0,4	0,33	2,27	2,6	4,7	Y/Y ₀ -0
5	ТМ–160/35	160	35	0,69	0,66	3,1	2,4	6,8	Δ /Y ₀ -11
6	ТМ–250/10	250	10	0,23	1,05	4,2	3,6	4,5	Y/Y ₀ -0
7	ТМ–320/10	320	10	0,525	1,35	4,6	5,5	4,5	Y/Y ₀ -0
8	ТМ–560/10	560	10	0,4	2,0	7,2	5,0	4,5	Y/Y ₀ -0
9	ТМ–630/35	630	35	0,4	1,95	7,6	2,0	6,5	Y/Y ₀ -0
10	ТМ–1000/6	1000	6,3	0,525	2,75	12,2	1,5	8,0	Δ /Y ₀ -11
11	ТМ–25/10	25	10	0,23	0,12	0,65	3,2	4,5	Y/Y ₀ -0
12	ТМ–40/10	40	10	0,4	0,18	1,0	3,0	4,7	Y/Y ₀ -0
13	ТМ–63/20	63	20	0,4	0,25	1,5	4,4	5,3	Y/Y ₀ -0
14	ТМ–100/10	100	10	0,4	0,31	2,0	2,6	4,7	Y/Y ₀ -0

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	TM-160/10	160	10	0,4	0,565	2,65	2,4	4,5	Y/Y ₀ -0
16	TM-250/10	250	10	0,4	1,0	4,2	3,5	4,7	Y/Y ₀ -0
17	TM-400/35	400	35	0,4	1,35	5,5	2,1	6,5	Y/Y ₀ -0
18	TM-560/35	560	35	0,4	6,0	10,5	6,0	6,5	Y/Y ₀ -0
19	TM-630/10	630	10	0,4	1,5	8,5	3,0	5,5	Y/Y ₀ -0
20	TM-1000/10	1000	10	0,69	2,45	11,6	2,8	5,5	Δ/Y ₀ -11
21	TM-25/6	25	6	0,4	0,13	0,6	3,2	4,5	Y/Y ₀ -0
22	TM-40/6	40	6	0,4	0,19	0,88	3,0	4,5	Y/Y ₀ -0
23	TM-63/6	63	6	0,4	0,26	1,28	2,0	4,5	Y/Y ₀ -0
24	TM-100/6	100	6	0,4	0,36	1,97	2,6	4,5	Y/Y ₀ -0
25	TM-160/10	160	10	0,69	0,56	2,65	2,4	4,5	Δ/Y ₀ -11
26	TM-250/10	250	10	0,69	0,82	3,7	2,3	4,5	Δ/Y ₀ -11
27	TM-400/10	400	10	0,69	1,08	5,9	3,0	4,5	Δ/Y ₀ -11
28	TM-630/20	630	20	0,4	2,4	6,3	1,9	6,5	Y/Y ₀ -0
29	TM-1000/10	1000	10	0,4	2,45	12,2	1,4	5,5	Δ/Y ₀ -11
30	TM-1600/10	1600	10	0,4	3,3	18,0	1,3	5,5	Δ/Y ₀ -11
31	TM-25/10	25	10	0,4	0,13	0,6	3,2	4,5	Y/Y ₀ -0
32	TM-160/35	160	35	0,4	0,7	2,65	2,6	6,5	Y/Y ₀ -0
33	TM-250/35	250	35	0,69	1,0	3,7	2,6	6,5	Δ/Y ₀ -11
34	TM-630/10	630	10	0,69	1,56	7,6	2,0	5,5	Δ/Y ₀ -11
35	TMC-1000/10	1000	10	0,4	2,75	12,2	1,5	8,0	Δ/Y ₀ -11
36	TM-2500/10	2500	10	0,4	4,6	25,0	1,0	5,5	Δ/Y ₀ -11
37	TM-4000/10	4000	10	0,4	6,4	33,5	0,9	5,5	Δ/Y ₀ -11
38	TM-6300/10	6300	10	0,4	9,0	46,5	0,8	6,5	Δ/Y ₀ -11
39	TM-400/10	400	10	0,4	1,05	5,5	2,1	4,5	Y/Y ₀ -0
40	TM-630/35	630	35	0,69	1,9	7,6	3,0	6,5	Δ/Y ₀ -11
41	TM-1000/35	1000	35	0,4	2,75	12,2	1,5	6,5	Δ/Y ₀ -11
42	TM-1600/35	1600	35	0,4	3,65	18,0	1,4	6,5	Δ/Y ₀ -11
43	TM-2500/35	2500	35	0,69	5,1	26,0	1,1	6,5	Δ/Y ₀ -11
44	TM3-400/10	400	10	0,4	1,08	5,5	4,5	5,5	Y/Y ₀ -0
45	TM3-630/10	630	10	0,4	1,68	7,6	3,2	6,5	Y/Y ₀ -0
46	TM3-1000/10	1000	10	0,69	2,45	11,0	1,4	5,5	Δ/Y ₀ -11
47	TM3-1600/10	2500	10	0,69	3,3	16,5	1,3	5,5	Δ/Y ₀ -11
48	TC3-10/0,66	10	0,66	0,4	0,07	0,28	7,0	4,5	Y/Y ₀ -0
49	TC3-16/0,66	16	0,66	0,23	0,12	0,4	5,8	4,5	Y/Y ₀ -0
50	TC3-25/0,66	25	0,66	0,4	0,14	0,56	4,8	4,5	Y/Y ₀ -0
51	TC3-40/0,66	40	0,66	0,23	0,2	0,8	4,0	4,5	Y/Y ₀ -0
52	TC3-63/0,66	63	0,66	0,23	0,35	1,1	3,3	4,5	Y/Y ₀ -0
53	TC3-100/0,66	100	0,66	0,23	0,4	1,5	2,7	4,5	Y/Y ₀ -0

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
54	ТС3–160/10	160	10,5	0,69	0,7	2,7	4,0	5,5	Δ/Y_0-11
55	ТС3–250/10	250	10,5	0,69	1,0	3,8	3,5	5,5	Δ/Y_0-11
56	ТС3–400/10	400	10,5	0,69	1,3	5,4	3,0	5,5	Δ/Y_0-11
57	ТС3–630/10	630	10,5	0,69	2,0	7,3	3,0	5,5	Δ/Y_0-11
58	ТС3–750/10	750	10,5	0,525	4,9	8,8	2,5	5,5	Δ/Y_0-11
59	ТС3–1000/10	1000	10,5	0,69	3,0	11,2	2,5	5,5	Δ/Y_0-11
60	ТС–180/10	180	10	0,525	1,6	3,0	4,0	5,5	Y/Y_0-0
61	ТМ–10/6	10	6	0,4	0,105	0,335	10,0	5,5	Y/Y_0-0
62	ТМ–20/6	20	6	0,4	0,18	0,60	9,0	5,5	Y/Y_0-0
63	ТМ–20/10	20	10	0,4	0,22	0,60	10,0	5,5	Y/Y_0-0
64	ТМ–50/6	50	6	0,525	0,35	1,325	6,5	5,5	Y/Y_0-0
65	ТМ–50/10	50	10	0,4	0,44	1,325	7,5	5,5	Y/Y_0-0
66	ТМ–100/35	100	35	0,525	0,9	2,4	7,0	6,5	Y/Y_0-0
67	ТМ–180/6	180	6	0,525	1,0	4,0	8,0	5,5	Y/Y_0-0
68	ТМ–180/10	180	10	0,525	1,2	4,1	6,0	5,5	Y/Y_0-0
69	ТМ–180/35	180	35	0,4	1,5	4,1	7,0	6,5	Y/Y_0-0
70	ТМ–320/6	320	6	0,525	1,6	6,07	7,5	5,5	Y/Y_0-0
71	ТМ–320/35	320	35	0,4	2,3	6,2	6,5	6,5	Y/Y_0-0
72	ТМ–750/10	750	10	0,525	4,1	11,9	6,0	5,5	Δ/Y_0-11
73	ТСМА–60/10	60	10	0,4	0,575	1,3	7,5	4,5	Y/Y_0-0
74	ТСМА–100/10	100	10	0,4	0,4	2,07	6,5	4,5	Y/Y_0-0
75	ТСМА–180/10	180	10	0,525	1,0	3,2	6,0	4,5	Y/Y_0-0
76	ТСМА–320/10	320	10	0,525	1,6	4,85	5,5	4,5	Y/Y_0-0
77	ТМА–100/10	100	10	0,525	0,65	2,4	7,0	5,5	Y/Y_0-0
78	ТМА–180/10	180	10	0,525	1,1	4,0	6,5	5,5	Y/Y_0-0
79	ТМА–320/10	320	10	0,525	1,7	6,1	6,5	5,5	Y/Y_0-0
80	ТАМ–560/10	560	10	0,525	2,5	9,4	6,0	5,5	Y/Y_0-0
81	ТАМ–750/10	750	10	0,525	4,1	11,9	6,0	5,5	Δ/Y_0-11
82	ТАМ–1000/10	1000	10	0,525	4,9	15,0	5,0	5,5	Δ/Y_0-11
83	ТАМ–1800/10	1800	10	0,525	8,0	24,0	4,5	5,5	Δ/Y_0-11
84	ТАМ–1800/35	1800	35	0,525	8,3	24,0	5,0	6,3	Δ/Y_0-11
85	ТАМ–3200/35	3200	38,5	10,5	11,5	37,0	4,5	7,0	Δ/Y_0-11
86	ТС–180/10	180	10	0,525	1,6	3,0	4,0	5,5	Y/Y_0-0
87	ТС–320/10	320	10	0,525	2,6	4,9	3,5	5,5	Y/Y_0-0
88	ТС–560/10	560	10	0,525	3,5	7,4	3,0	5,5	Y/Y_0-0
89	ТС–750/10	750	10	0,525	4,0	8,8	2,5	5,5	Δ/Y_0-11
90	ТС–560/15	560	13,8	0,4	3,4	6,4	3,0	8,0	Y/Y_0-0
91	ТС3–1600/10	1600	10,5	0,69	4,2	16,0	2,5	5,5	$Y/\Delta-11$

П р и м е ч а н и е. Условное обозначение трансформатора включает: а) буквенное обозначение: первая буква показывает число фаз – для трехфазных – Т, однофазных – О; вторая буква это вид охлаждения – естественная циркуляция воздуха и масла – М, естественное воздушное при открытом исполнении – С, естественное воздушное при защищенном исполнении – СЗ, принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла – Д; б) обозначение номинальной мощности и класса напряжения. Между частями условного обозначения ставится тире.

Задача № 2. Используя паспортные данные трехфазных асинхронных двигателей, приведённые в табл. 2.2, рассчитать: 1) номинальную частоту вращения; 2) номинальный вращающий момент на валу; 3) потребляемые из сети активную, реактивную, и полную мощности при номинальной нагрузке; 4) пусковой момент; 5) максимальный (критический) момент; 6) скольжение при максимальном моменте, т. е. критическое скольжение; 7) номинальные (линейные и фазные) токи обмоток статора; 8) пусковой ток.

Построить механическую характеристику двигателя, т. е., зависимость момента от скольжения $M = f(s)$, приняв вращающий момент на валу равным электромагнитному (механическими потерями пренебрегаем). Схема соединения фаз статора Y/Δ, 380/220 В.

Т а б л и ц а 2.2 – Технические данные трёхфазных асинхронных электродвигателей серий 4А и АИР основного исполнения (степень защиты IP44, класс нагревостойкости F)

№ варианта	Тип	Мощность P_2 , кВт	Скольжение $S_{ном}, \%$	КПД $\eta, \%$	$\cos \varphi$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{п}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$	Линейное напряжение сети U_L , В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения $n_0 = 3000 \text{ мин}^{-1}$									
1	АИР71А2	0,75	6	78,5	0,83	2,2	2,1	6	220
2	АИР71В2	1,1	6,5	79	0,83	2,2	2,1	6	220

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	АИР80А2	1,5	5	81	0,85	2,2	2,1	7	380
4	АИР80В2	2,2	5	83	0,87	2,2	2	7	380
5	АИР90L2	3	5	84,5	0,88	2,2	2	7	220
6	АИР100S2	4	5	87	0,88	2,2	2	7,5	380
7	АИР100L2	5,5	5	88	0,89	2,2	2	7,5	380
8	АИР112М2	7,5	3,5	87,5	0,88	2,2	2	7,5	380
9	АИР132М2	11	3	88	0,9	2,2	1,6	7,5	220
10	АИР160S2	15	3	89	0,89	2,7	1,8	7	220
11	АИР160М2	18,5	3	89,5	0,9	2,7	1,8	7	380
12	АИР180S2	22	2,7	89,5	0,88	2,7	1,7	7	380
13	АИР180М2	30	2,5	90,5	0,88	2,7	1,7	7,5	380
14	4А112М2У3	7,5	2,6	87,5	0,88	2,2	2,0	7,5	220
15	4А200М2У3	37	1,9	90	0,89	2,2	1,4	7,5	220
16	4А200L2У3	45	1,8	91	0,9	2,2	1,4	7,5	380
17	4А225М2У3	55	2,1	91	0,92	2,2	1,2	7,5	220
18	4А225S2У3	75	1,4	91	0,89	2,2	1,2	7,5	220
19	4А250М2У3	90	1,4	92	0,9	2,2	1,2	7,5	220
20	4А280S2У3	110	2	91	0,89	2,2	1,2	7	380
Синхронная частота вращения $n_0 = 1500 \text{ мин}^{-1}$									
21	АИР71А4	0,55	9,5	70,5	0,7	2,3	2,2	5	220
22	АИР71В4	0,75	10	73	0,73	2,2	2,2	5	220
23	АИР80А4	1,1	7	75	0,81	2,2	2,2	5,5	380
24	АИР80В4	1,5	7	78	0,83	2,2	2,2	5,5	220
25	АИР90L4	2,2	7	81	0,83	2,2	2,1	6,5	380
26	АИР100S4	3	6	82	0,83	2,2	2	7	380
27	АИР100L4	4	6	85	0,84	2,2	2	7	380
28	АИР112М4	5,5	4,5	87,5	0,88	2,2	2	7	220
29	АИР132S4	7,5	4	87,5	0,86	2,2	2	7,5	220
30	АИР132М4	11	3,5	87,5	0,87	2,2	2	7,5	380
31	АИР160S4	15	3	89,5	0,89	2,9	1,9	7	380
32	АИР160М4	18,5	3	90	0,89	2,9	1,9	7	220
33	АИР180S4	22	2,5	90	0,87	2,4	1,5	6,5	380
34	АИР180М4	30	2	91,5	0,86	2,7	1,7	7	380
35	4А200М2У3	37	1,7	91	0,9	2,2	1,4	7	380
36	4А200L2У3	45	1,8	92	0,9	2,2	1,4	7	220
37	4А225М2У3	55	2	92,5	0,9	2,2	1,2	7	220
38	4А225S2У3	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2	7	380
39	4А250М2У3	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2	7	380

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения $n_0 = 1000 \text{ мин}^{-1}$									
40	4A280S2Y3	110	2,3	92,5	0,9	2	1,2	7	380
41	АИР71А6	0,37	8,5	65	0,66	2,2	2	4,5	220
42	АИР71В6	0,55	8,5	68,5	0,7	2,2	2	4,5	220
43	АИР80А6	0,75	8	70	0,72	2,2	2	4,5	380
44	АИР80В6	1,1	8	74	0,74	2,2	2	4,5	380
45	АИР90L6	1,5	7,5	76	0,72	2,2	2	6	220
46	АИР100L6	2,2	5,5	81	0,74	2,2	2	6	220
47	АИР112МА6	3	5	81	0,76	2,2	2	6	380
48	АИР112МВ6	4	5	82	0,81	2,2	2	6	380
49	АИР132S6	5,5	4	85	0,8	2,2	2	7	220
50	АИР132М6	7,5	4	85	0,81	2,2	2	7	220
51	АИР160S6	11	3	87	0,84	2,5	1,7	6,5	220
52	АИР160М6	15	3	88	0,85	2,6	1,7	6,5	380
53	АИР180М6	18,5	2	88	0,85	2,4	1,6	6,5	380
54	4A132M6Y3	7,5	3,2	85,5	0,81	2,2	2	7	380
55	4A160L6Y3	11	3	86	0,86	2	1,2	6	380
56	4A200M6Y3	22	2,5	90	0,9	2	1,2	6,5	220
57	4A200L6Y3	30	2,3	90,5	0,9	2	1,2	6,5	220
58	4A225M6Y3	37	2	91	0,89	2	1,2	6,5	380
59	4A250L6Y3	45	1,5	91,5	0,89	2	1,2	7	380
60	4A280S6Y3	75	2,0	92	0,89	2,2	1,2	7	380
Синхронная частота вращения $n_0 = 750 \text{ мин}^{-1}$									
61	4A160S8Y3	7,5	2,5	86	0,75	2,2	1,4	6	220
62	4A160M8Y3	11	2,5	87	0,75	2,2	1,4	6	380
63	4A180M8Y3	15	2,6	87	0,82	2	1,2	5,5	220
64	4A200M8Y3	18,5	2,3	88,5	0,84	2,2	1,2	5,5	380
65	4A200L8Y3	22	2,7	88,5	0,84	2	1,2	5,5	220
66	4A225M8Y3	30	1,8	90,5	0,81	2,1	1,3	6	380
67	4A250S8Y3	37	1,6	90	0,83	2	1,2	6	380
68	4A250M8Y3	45	1,4	91	0,84	2	1,2	6	380
69	4A280S8Y3	55	2,2	92	0,84	2	1,2	5,5	380
70	4A280M8Y3	75	2,2	92,5	0,85	2	1,2	5,5	380
71	4A315S8Y3	90	1,5	93	0,85	2,3	1,2	6,5	220
72	4A315M8Y3	110	1,5	93	0,85	2,3	1,2	6,5	380
73	4A355S8Y3	132	1,3	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5	220
74	4A355M8Y3	160	1,3	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5	380
75	4АН355М8У3	200	1,8	94	0,86	1,9	1,1	5,5	380

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения $n_0 = 600 \text{ мин}^{-1}$									
76	4A250S10Y3	30	1,9	88	0,81	1,9	1,2	6	220
77	4A280S10Y3	37	1,7	91	0,78	1,8	1	6	380
78	4A280M10Y3	45	1,7	91,5	0,78	1,8	1	6	220
79	4A315S10Y3	55	1,8	92	0,79	1,8	1	6	380
80	4A315M10Y3	75	1,6	92	0,8	1,8	1	6	220
81	4A355S10Y3	90	1,6	92,5	0,83	1,8	1	6	380
82	4A355M10Y3	110	1,6	93,5	0,83	1,8	1	6	380
Синхронная частота вращения $n_0 = 1000 \text{ мин}^{-1}$									
83	4АН180S6Y3	18,5	2,5	87	0,85	2	1,2	6	220
84	4АН180M6Y3	22	2,4	88,5	0,87	2	1,2	6	380
85	4АН200M6Y3	30	2,3	90	0,88	2,1	1,3	6	220
86	4АН200L6Y3	37	1,9	90,5	0,88	2,1	1,3	6,5	380
87	4АН225M6Y3	45	2	91	0,87	2	1,2	6,5	220
88	4АН250S6Y3	55	1,3	92,5	0,87	2	1,2	6,5	380
89	4АН250M6Y3	75	1,2	93	0,87	2	1,2	7	220
90	4АН280S6Y3	90	2,2	92,5	0,89	2	1,2	6	380
91	4A250M6Y3	55	1,5	92	0,88	2	1,2	7	220

Примечание. Структура обозначения типоразмеров АД следующая: первые два (три) знака – название серии (4А); три следующие цифры – высота оси вращения в мм; затем следует обозначение установочного размера по длине станины (меньший – S, средний – М, больший – L); следующая цифра обозначает число полюсов (2, 4, 6 и т.д.); последние буква и цифра обозначают климатическое исполнение и категорию размещения по ГОСТ 15150-69. В частности, УЗ обозначает, что двигатели предназначены для эксплуатации в районах с умеренным (У) климатом в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий (цифра 3).

Задача № 3. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет данные, приведенные в табл. 2.3: число пар полюсов $2p$, номинальная мощность $P_{2н}$, линейное напряжение обмотки ротора $U_{2н}$, активные сопротивления фазы статора r_1 и ротора r_2' при 20°C , индуктивные сопротивления статора x_1 и

ротора x_2' . Частота сети $f_1 = 50$ Гц, напряжение $U_1 = 380$ В. Соединение обмоток статора и ротора "звезда". Класс нагревостойкости изоляции F, расчетная температура обмоток 115°C .

Требуется: 1) определить синхронную частоту вращения, потребляемый ток, момент и коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутой накоротко обмоткой ротора, т.е. без пускового реостата; 2) определить сопротивление пускового реостата R_p , при котором начальный пусковой момент имеет максимально возможное значение; определить в этом режиме пусковой момент, ток статора и коэффициент мощности; 3) рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора: $R_d = 0$, $R_d = R_p/2$, $R_d = R_p$.

Т а б л и ц а 2.3 – Технические данные трёхфазных АД с фазным ротором

№ варианта	Тип двигателя	2p	$P_{2н}$, кВт	$U_{2н}$, В	r_1 , Ом	r_2' , Ом	x_1 , Ом	x_2' , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4АК160S4У3	4	11	305	0,038	0,051	0,068	0,086
2	4АК160M4У3	4	14	300	0,032	0,042	0,060	0,078
3	4АК180M4У3	4	18,5	295	0,022	0,034	0,042	0,063
4	4АК200M4У3	4	22	340	0,024	0,026	0,050	0,075
5	4АК200L4У3	4	30	360	0,026	0,030	0,057	0,087
6	4АК225M4У3	4	37	160	0,023	0,027	0,061	0,059
7	4АК250SA4У3	4	45	230	0,020	0,030	0,067	0,080
8	4АК250SB4У3	4	55	200	0,017	0,025	0,061	0,073
9	4АК250M4У3	4	71	250	0,015	0,021	0,053	0,064
10	4АК160S6У3	6	7,5	300	0,054	0,068	0,079	0,12
11	4АК160M6У3	6	10	310	0,043	0,058	0,071	0,13
12	4АК180M6У3	6	13	325	0,035	0,057	0,065	0,11
13	4АК200M6У3	6	18	360	0,030	0,038	0,060	0,078
14	4АК200L6У3	6	22	330	0,032	0,041	0,066	0,089
15	4АК225M6У3	6	30	140	0,029	0,030	0,073	0,091

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	4AK250S6Y3	6	37	150	0,026	0,024	0,063	0,078
17	4AK250M6Y3	6	45	180	0,029	0,024	0,062	0,092
18	4AK160S8Y3	8	5,5	300	0,060	0,094	0,112	0,175
19	4AK160M8Y3	8	7,1	290	0,053	0,079	0,11	0,208
20	4AK180M8Y3	8	11	270	0,041	0,062	0,086	0,167
21	4AK200M8Y3	8	15	360	0,040	0,048	0,081	0,12
22	4AK200L8Y3	8	18,5	300	0,038	0,046	0,089	0,12
23	4AK225M8Y3	8	22	102	0,039	0,043	0,10	0,13
24	4AK250S8Y3	8	30	125	0,033	0,034	0,081	0,10
25	4AK250M8Y3	8	37	148	0,031	0,031	0,078	0,10
26	4АНК160S4Y3	4	14	330	0,047	0,061	0,081	0,10
27	4АНК160M4Y3	4	17	315	0,035	0,047	0,067	0,087
28	4АНК180S4Y3	4	22	300	0,033	0,054	0,061	0,089
29	4АНК180M4Y3	4	30	290	0,028	0,044	0,055	0,083
30	4АНК200M4Y3	4	37	360	0,029	0,035	0,065	0,099
31	4АНК200L4Y3	4	45	375	0,029	0,03	0,067	0,10
32	4АНК225M4Y3	4	55	170	0,031	0,035	0,084	0,10
33	4АНК250SA4Y3	4	75	180	0,028	0,039	0,091	0,11
34	4АНК250SB4Y3	4	90	220	0,021	0,031	0,075	0,10
35	4АНК250M4Y3	4	110	250	0,022	0,031	0,078	0,10
36	4АНК280S4Y3	4	132	251	0,028	0,031	0,13	0,14
37	4АНК280M4Y3	4	160	300	0,024	0,028	0,12	0,14
38	4АНК315S4Y3	4	200	312	0,022	0,026	0,14	0,14
39	4АНК315M4Y3	4	250	360	0,022	0,025	0,15	0,14
40	4АНК355S4Y3	4	315	420	0,020	0,022	0,12	0,15
41	4АНК355M4Y3	4	400	505	0,019	0,020	0,12	0,14
42	4АНК180S6Y3	6	13	205	0,048	0,079	0,084	0,11
43	4АНК180M6Y3	6	18,5	360	0,044	0,077	0,087	0,11
44	4АНК200M6Y3	6	22	380	0,032	0,043	0,071	0,11
45	4АНК200L6Y3	6	30	375	0,032	0,042	0,073	0,12
46	4АНК225M6Y3	6	37	140	0,032	0,038	0,079	0,10
47	4АНК250SA6Y3	6	45	155	0,028	0,032	0,069	0,098
48	4АНК250SB6Y3	6	55	190	0,024	0,027	0,060	0,088
49	4АНК250M6Y3	6	75	250	0,022	0,025	0,059	0,087
50	4АНК280S6Y3	6	90	202	0,033	0,038	0,12	0,14
51	4АНК280M6Y3	6	110	230	0,034	0,038	0,13	0,14
52	4АНК315S6Y3	6	132	257	0,026	0,029	0,12	0,14
53	4АНК315M6Y3	6	160	291	0,024	0,024	0,11	0,13
54	4АНК355S6Y3	6	200	304	0,025	0,027	0,13	0,16

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
55	4АНК355М6У3	6	250	380	0,022	0,023	0,12	0,15
56	4АНК180S8У3	8	11	270	0,049	0,074	0,098	0,11
57	4АНК180М8У3	8	14	360	0,047	0,055	0,099	0,092
58	4АНК200М8У3	8	18,5	380	0,046	0,054	0,097	0,14
59	4АНК200L8У3	8	22	330	0,042	0,066	0,095	0,14
60	4АНК225М8У3	8	30	120	0,043	0,046	0,098	0,15
61	4АНК250SA8У3	8	37	115	0,044	0,047	0,10	0,13
62	4АНК250SB8У3	8	45	140	0,036	0,040	0,090	0,13
63	4АНК250М8У3	8	55	190	0,029	0,031	0,076	0,11
64	4АНК280S8У3	8	75	190	0,031	0,040	0,14	0,15
65	4АНК280М8У3	8	90	214	0,031	0,040	0,14	0,16
66	4АНК315S8У3	8	110	225	0,030	0,032	0,14	0,16
67	4АНК315М8У3	8	132	247	0,031	0,031	0,14	0,16
68	4АНК355S8У3	8	160	285	0,024	0,026	0,19	0,15
69	4АНК355М8У3	8	200	350	0,022	0,025	0,13	0,15
70	4АНК280S10У3	10	45	162	0,035	0,061	0,18	0,17
71	4АНК280М10У3	10	55	185	0,036	0,053	0,12	0,16
72	4АНК315S10У3	10	75	217	0,036	0,052	0,14	0,19
73	4АНК315М10У3	10	90	260	0,034	0,045	0,13	0,17
74	4АНК355S10У3	10	110	283	0,031	0,044	0,15	0,17
75	4АНК355М10У3	10	132	330	0,031	0,041	0,14	0,16
76	4АНК315S12У3	12	55	165	0,044	0,073	0,18	0,27
77	4АНК315М12У3	12	75	207	0,036	0,059	0,14	0,22
78	4АНК355S12У3	12	90	222	0,034	0,057	0,16	0,24
79	4АНК355М12У3	12	110	265	0,031	0,052	0,16	0,23
80	4AK160S4У3	4	11	305	0,038	0,051	0,068	0,086
81	4AK160M4У3	4	14	300	0,032	0,042	0,060	0,078
82	4AK180M4У3	4	18,5	295	0,022	0,034	0,042	0,063
83	4AK200M4У3	4	22	340	0,024	0,026	0,050	0,075
84	4AK200L4У3	4	30	360	0,026	0,030	0,057	0,087
85	4AK225M4У3	4	37	160	0,023	0,027	0,061	0,059
86	4AK250SA4У3	4	45	230	0,020	0,030	0,067	0,080
87	4AK250SB4У3	4	55	200	0,017	0,025	0,061	0,073
88	4AK250M4У3	4	71	250	0,015	0,021	0,053	0,064
89	4AK160S6У3	6	7,5	300	0,054	0,068	0,079	0,12
90	4AK160M6У3	6	10	310	0,043	0,058	0,071	0,13
91	4AK200M4УВ	2	22	340	0,024	0,026	0,050	0,075

Задача № 4. Используя технические данные электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением, приведённые в табл. 2.4, рассчитать: 1) номинальный момент на валу; 2) ток, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке; 3) пусковой ток при пуске двигателя без пускового сопротивления и его кратность по отношению к номинальному; 4) пусковое сопротивление $R_{\text{п}}$ для условия $I_{\text{п}} = 3I_{\text{Я ном}}$ и пусковой момент при пуске двигателя с пусковым реостатом; 5) добавочное сопротивление регулировочного реостата $R_{\text{р}}$, которое необходимо ввести в цепь возбуждения, чтобы частота вращения идеального холостого хода была равна максимально допустимой для данного типа двигателя (табл. 2.4).

Построить естественную механическую характеристику двигателя и три искусственных: 1) при включённом пусковом сопротивлении $R_{\text{п}}$ в цепи якоря; 2) при ослабленном магнитном потоке с регулировочным сопротивлением $R_{\text{р}}$ в цепи возбуждения; 3) при понижении напряжения питания цепи якоря, равном $0,8 U_{\text{ном}}$.

Составить баланс потерь в двигателе, в том числе определить потери мощности в регулировочных реостатах при регулировании частоты вращения с постоянным моментом $M = M_{\text{ном}} = \text{const}$.

При расчётах принять, что магнитный поток не зависит от тока якоря, а магнитные и механические потери постоянны.

Схема включения и универсальная кривая намагничивания двигателей приведены на рис. 2.1 и 2.2.

Т а б л и ц а 2.4 – Технические данные двигателей серии 2П с высотами оси вращения 132 – 160 мм

№ варианта	Мощность P_2 , кВт	Напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В	Частота вращения, мин ⁻¹		КПД η , %	Сопротивление обмотки, Ом		
			номинальная $n_{\text{ном}}$	максимальная n_{max}		якоря R_a	добавочных полюсов $R_{\text{дп}}$	возбуждения R_B
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 2ПБ132МУХЛ4								

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,6	110	1060	4000	71	0,346	0,224	54,5
2	1,6	220	1000	3000	70,5	1,38	1	202
3	2,4	110	1600	4000	76,5	0,185	0,148	54,5
4	2,4	220	1600	4000	77	0,74	0,486	202
5	3,7	110	2200	4000	79,5	0,104	0,059	54,5
6	3,7	220	2360	4000	81	0,346	0,224	202
7	4,5	110	3150	4000	81	0,046	0,029	54,5
8	4,5	220	3150	4000	81,5	0,185	0,148	202
Тип 2ПБ132ЛУХЛ4								
9	1,3	110	800	3000	73	0,412	0,296	50
10	1,3	220	800	2500	72	1,98	1,38	216
11	1,9	110	1060	4000	76	0,269	0,22	50
12	1,9	220	1060	3000	76,5	1,08	0,915	216
13	3,2	110	1600	4000	82	0,12	0,089	50
14	3,2	220	1600	4000	82,5	0,518	0,323	216
15	4,5	110	2360	4000	84	0,055	0,039	43
16	4,5	220	2200	4000	84	0,269	0,22	189
17	5,3	220	3000	4000	85,5	0,167	0,124	216
Тип 2ПО132МУХЛ4								
18	1,3	220	800	2500	66,5	1,88	1,39	175
19	1,8	110	1000	4000	70	0,346	0,224	46,5
20	1,8	220	1000	3000	64,5	1,38	1	175
21	2,8	110	1500	4000	75,5	0,14	0,094	46,5
22	2,8	220	1500	4000	76,5	0,601	0,454	175
23	4,5	110	2200	4000	80,5	0,067	0,049	46,5
24	4,5	220	2240	4000	81	0,271	0,204	175
25	5,5	220	3000	4000	83	0,185	0,148	175
Тип 2ПО132ЛУХЛ4								
26	1,6	110	800	3000	71	0,322	0,27	37,4
27	1,6	220	750	2500	71	1,57	1,06	138
28	2,2	110	1000	4000	74	0,22	0,196	37,4
29	2,2	220	1000	3000	75,5	0,88	0,64	138
30	3,4	110	1500	4000	79	0,12	0,089	37,4
31	3,4	220	1600	4000	81	0,412	0,296	138
32	5,3	110	2200	4000	83,5	0,055	0,039	37,4
33	5,3	220	2200	4000	83,5	0,22	0,196	138
Тип 2ПФ132МУХЛ4								
34	2	110	750	3750	68	0,435	0,244	35
35	2	220	750	2500	67	1,693	1,26	134

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
36	3	110	1060	4000	73,5	0,226	0,166	35
37	3	220	1060	3000	74	0,906	0,692	134
38	4	110	1500	4200	77,5	0,14	0,094	25,6
39	4	220	1500	4200	80,5	0,472	0,308	111
40	4	110	2200	4000	83	0,067	0,049	46
41	6	220	2360	4000	83,5	0,226	0,166	111
42	7,5	220	3000	4000	85	0,14	0,094	111
Тип 2ПФ132ЛУХЛ4								
43	2,8	110	750	3750	66,5	0,269	0,22	25
44	2,8	220	750	2500	67	1,08	0,915	89
45	4,2	110	950	4000	72	0,167	0,124	20,6
46	4,2	220	1000	3000	73	0,67	0,445	76
47	5,5	110	1500	4200	79	0,08	0,066	20,6
48	5,5	220	1600	4200	80,5	0,269	0,22	76
49	7,5	110	2200	4000	83	0,055	0,039	43
50	7,5	220	2120	4000	83,5	0,167	0,124	76
Тип 2ПН160МУХЛ4								
51	3	110	750	3000	75,5	0,138	0,135	34,3
52	3	220	750	2500	76,5	0,732	0,485	128
53	4,5	110	950	4000	78,5	0,11	0,078	26,8
54	4,5	220	1000	3000	79,5	0,411	0,304	108
55	7,5	110	1600	4000	83	0,037	0,024	21,9
56	7,5	220	1500	4000	83	0,183	0,135	82
Тип 2ПН160ЛУХЛ4								
57	4	110	750	3000	77,5	0,13	0,102	32,8
58	4	220	800	2500	78,5	0,486	0,389	117
59	6,3	110	1000	4000	80,5	0,069	0,049	23,6
60	6,3	220	1000	3000	81,5	0,278	0,196	87,6
61	11	220	1500	4000	85,5	0,096	0,073	65,3
62	16	220	2360	4000	86,5	0,044	0,031	49,4
63	24	220	3150	4000	88,0	0,024	0,017	49,4
Тип 2ПБ160МУХЛ4								
64	2,1	110	800	3000	77,0	0,235	0,151	46,4
65	2,1	220	750	2500	76,5	0,99	0,72	177
66	2,5	110	1000	4000	80,5	0,145	0,101	46,4
67	2,5	220	1000	3000	80,0	0,59	0,43	177
68	4,2	110	1500	4000	83,5	0,081	0,056	46,4
69	4,2	220	1500	4000	84,5	0,326	0,208	177
70	6,0	220	2120	4000	86,5	0,145	0,101	177

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
71	7,1	220	3000	4000	85,5	0,081	0,056	201
Тип 2ПБ160ЛУХЛ4								
72	2,5	110	750	3000	78,5	0,171	0,131	49,4
73	2,5	220	800	2500	79,5	0,609	0,256	181
74	3,2	110	1060	4000	82,0	0,096	0,073	49,4
75	3,2	220	1060	3000	82,5	0,385	0,364	181
76	5,3	220	1500	4000	85,5	0,216	0,175	181
77	7,5	220	2240	4000	88,0	0,096	0,073	181
78	8,1	220	3350	4000	86,5	0,044	0,031	181
Тип 2ПО160МУХЛ4								
79	2,5	110	750	3000	75,0	0,235	0,151	40,7
80	2,5	220	750	2500	76,5	0,836	0,647	148
81	3,2	110	1120	4000	80,5	0,11	0,078	40,7
82	3,2	220	1000	3000	79,5	0,516	0,407	148
83	6,0	220	1600	4000	84,5	0,235	0,151	148
84	8,0	110	2240	4000	86,0	0,037	0,024	53
85	8,0	220	2240	4000	86,5	0,145	0,101	148
86	9,5	110	3000	4000	86,0	0,02	0,018	53
87	9,5	220	3000	4000	87,5	0,081	0,056	148
Тип 2ПО160ЛУХЛ4								
88	3,2	110	750	3000	78,0	0,13	0,12	32,8
89	3,2	220	750	2500	79,0	0,525	0,414	117
90	4,0	110	950	4000	80,5	0,096	0,073	32,7
91	6,7	220	3000	4000	86	0,12	0,089	138

Примечание. Первые два знака условного обозначения машин постоянного тока характеризуют название серии (2П); следующая буква – это исполнение по способу защиты и вентиляции (закрытое с естественным охлаждением – Б, закрытое с внешним обдувом – О, защищённое с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора – Ф, защищённое с самовентиляцией – Н); три следующие цифры – высота оси вращения в мм; буква после высоты вращения обозначает длину сердечника якоря (средняя – М, большая – L); последние три буквы с цифрой характеризуют климатическое исполнение и категорию размещения по ГОСТ 15150–69. Аббревиатура УХЛ4 обозначает, что двигатель предназначен для эксплуатации в

районах с умеренным (У) и холодным (ХЛ) климатом в закрытых отапливаемых производственных помещениях (4).

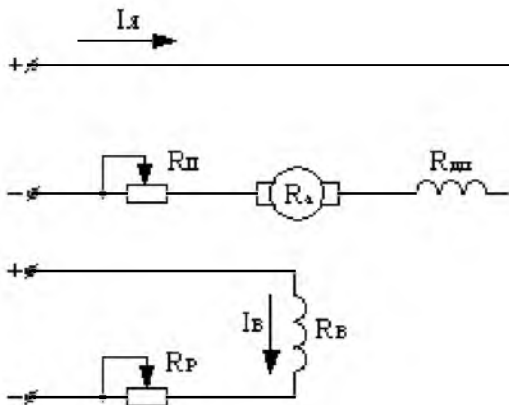


Рис. 2.1

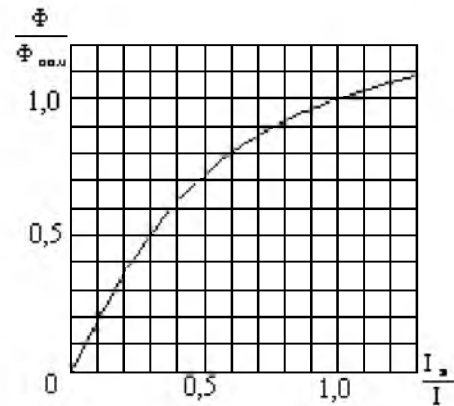


Рис. 2.2

Задача № 5. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные, приведённые в табл. 2.5: напряжение на зажимах двигателя U_H , мощность на валу P_{2H} , частота вращения n_H , коэффициент полезного действия η_H , сопротивления цепей якоря R_A и возбуждения R_B .

Изобразить электрическую схему электродвигателя. Рассчитать характеристики двигателя: зависимости - частоты вращения якоря n , момента на валу M , коэффициента полезного действия η , полезной мощности P_2 от тока якоря при значениях, равных 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от номинального значения.

Т а б л и ц а 2.5 – Технические данные ДПТ с параллельным возбуждением

№ варианта	U_H В	P_{2H} кВт	n_H об/мин	η_H %	R_A Ом	R_B Ом
1	2	3	4	5	6	7
1	110	1,6	750	68,0	0,78	35
2	220	1,6	750	68,5	3,27	134
3	110	2,5	1000	72,0	0,405	35

Продолжение табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
4	220	2,5	1000	73,5	1,843	134
5	110	4,0	1500	77,5	0,234	35
6	220	4,0	1500	79,0	0,9	134
7	110	7,0	2200	81,0	0,116	25,6
8	220	7,0	2240	83,0	0,392	111
9	220	10,5	3000	84,0	0,234	111
10	110	1,9	750	71,0	0,592	37,5
11	220	1,9	750	72,0	2,28	138
12	110	3,0	950	74,5	0,416	37,5
13	220	3,0	1000	75,5	1,52	138
14	110	5,5	1500	80,0	0,146	27,8
15	220	5,5	1500	80,5	0,592	101
16	220	8,5	2200	84,0	0,291	25
17	220	14,0	3150	86,0	0,146	20,6
18	110	1,1	750	64,0	0,9	54,5
19	220	1,1	800	67,0	3,97	202
20	110	1,6	1060	71,0	0,57	54,5
21	220	1,6	1000	70,5	2,38	202
22	110	2,4	1600	76,5	0,333	54,5
23	220	2,4	1600	77,0	1,226	202
24	110	3,7	2200	79,5	0,163	54,5
25	220	3,7	2360	81,0	0,57	202
26	110	4,5	3150	81,0	0,075	54,5
27	220	4,5	3150	81,5	0,333	202
28	110	1,3	800	73,0	0,708	50
29	220	1,3	800	72,0	3,36	216
30	110	1,9	1060	76,0	0,489	50
31	220	1,9	1060	76,5	2,484	216
32	110	3,2	1600	82,0	0,209	50
33	220	3,2	1600	82,5	0,841	216
34	110	4,5	2360	84,0	0,094	43
35	220	4,5	2200	84,0	0,489	189
36	220	5,3	3000	85,5	0,291	216
37	110	1,3	800	65,5	0,78	46,5

Продолжение табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
38	220	1,3	800	66,5	3,27	175
39	110	1,8	1000	70,0	0,57	46,5
40	220	1,8	1000	64,5	2,38	175
41	110	2,8	1500	75,5	0,234	46,5
42	220	2,8	1500	76,5	1,055	175
43	110	4,5	2200	80,5	0,116	46,5
44	220	4,5	2240	81,0	0,475	175
45	220	5,5	3000	83,0	0,333	175
46	110	1,6	800	71,0	0,592	37,4
47	220	1,6	750	71,0	2,63	138
48	110	2,2	1000	74,0	0,416	37,4
49	220	2,2	1000	75,5	1,52	138
50	110	3,4	1500	79,0	0,209	37,4
51	220	3,4	1600	81,0	0,708	138
52	110	5,3	2200	83,5	0,094	37,4
53	220	5,3	2200	83,5	0,416	138
54	220	6,7	3000	86,0	0,209	138
55	110	2,0	750	68,0	0,679	35
56	220	2,0	750	67,0	2,953	134
57	110	3,0	1060	73,5	0,392	35
58	220	3,0	1060	74,0	1,598	134
59	110	4,0	1500	77,5	0,234	25,6
60	220	4,0	1500	80,5	0,78	111
61	110	6,0	2200	83,0	0,116	46
62	220	6,0	2360	83,5	0,392	111
63	220	7,5	3000	85,0	0,234	111
64	110	2,8	750	66,5	0,489	25
65	220	2,8	750	67,0	1,995	89
66	110	4,2	950	72,0	0,291	20,6
67	220	4,2	1000	73,0	1,115	76
68	110	5,5	1500	79,0	0,146	20,6
69	220	5,5	1600	80,5	0,489	76
70	110	7,5	2200	83,0	0,094	43
71	220	7,5	2120	83,5	0,291	76

Продолжение табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
72	220	11,0	3000	85,5	0,146	76
73	110	3,0	750	75,5	0,273	34,3
74	220	3,0	750	76,5	1,217	128
75	110	4,5	950	78,5	0,188	26,8
76	220	4,5	1000	79,5	0,715	108
77	110	7,5	1600	83,0	0,061	21,9
78	220	7,5	1500	83,0	0,318	82
79	220	13,0	2120	85,5	0,137	12,6
80	220	18,0	3150	87,0	0,061	53,1
81	110	4,0	750	77,5	0,232	32,8
82	220	4,0	800	78,5	0,875	117
83	110	6,3	1000	80,5	0,118	23,6
84	220	6,3	1000	81,5	0,474	87,6
85	220	11,0	1500	85,5	0,169	65,3
86	220	16,0	2360	86,5	0,075	49,4
87	220	24,0	3150	88,0	0,041	49,4
88	110	2,1	800	77,0	0,386	46,4
89	220	2,1	750	76,5	1,71	177
90	110	2,5	1000	80,5	0,246	46,4
91	220	2,8	3000	85,5	0,6	190

Задача № 6. Трёхфазный синхронный генератор имеет параметры, приведённые в табл. 2.6: номинальная полная мощность $S_{\text{НОМ}}$, номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{\text{НОМ}}$ при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», КПД при номинальной нагрузке $\eta_{\text{НОМ}}$, число полюсов $2p$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{Н}}$.

Требуется определить: активную мощность генератора при номинальной нагрузке $P_{\text{НОМ}}$, ток в обмотке статора $I_{\text{НОМ}}$, требуемую первичному двигателю мощность P_1 и вращающий момент M_1 при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя.

Т а б л и ц а 2.6 – Технические данные СГ

№ варианта	$S_{НОМ},$ кВА	$U_{IНОМ},$ кВ	$\cos \varphi_H$	$\eta_{НОМ}, \%$	2р
1	2	3	4	5	6
1	700	0,4	0,9	93,8	16
2	6,25	0,23	0,9	80,2	4
3	15	0,4	0,9	86,0	4
4	25	0,23	0,9	87,0	4
5	3125	3,15	0,8	97,2	2
6	253000	15,75	0,85	97,1	44
7	188200	18,0	0,9	98,5	2
8	259000	15,75	0,9	98,6	2
9	376000	20,0	0,9	98,75	2
10	889	0,4	0,9	94,1	16
11	31,5	0,4	0,9	88,0	4
12	62,5	0,23	0,9	90,0	4
13	10	0,4	0,9	84,7	4
14	3125	6,3	0,8	97,2	2
15	206000	15,75	0,85	98,05	60
16	411800	20,0	0,9	98,75	2
17	78750	10,5	0,8	98,3	2
18	125000	10,5	0,8	98,43	2
19	137500	10,5	0,8	98,5	2
20	700	0,4	0,9	94,4	16
21	15	0,23	0,9	85,0	4
22	25	0,4	0,9	86,0	4
23	37,5	0,23	0,9	88,2	4
24	5000	3,15	0,8	97,4	2
25	190000	15,75	0,9	98,2	84
26	470600	20,0	0,9	98,7	2
27	235294	15,75	0,85	98,6	2
28	352941	20,0	0,85	98,7	2
29	588235	20,0	0,85	98,83	2
30	700	6,3	0,9	93,7	16
31	25	0,23	0,9	86,0	6
32	37,5	0,4	0,9	88,2	6
33	62,5	0,23	0,9	89,3	4
34	5000	6,3	0,8	97,4	2
35	150000	13,8	0,9	98,39	80

Продолжение табл. 2.6

1	2	3	4	5	6
36	588200	20,0	0,9	98,75	2
37	588235	20,0	0,85	98,8	4
38	352941	20,0	0,85	98,8	2
39	91800	13,8	0,85	97,9	104
40	889	6,3	0,9	93,8	16
41	62,5	0,4	0,9	89,6	6
42	75	0,23	0,9	90,5	4
43	93,7	0,4	0,9	91,0	4
44	7500	6,3	0,8	97,6	2
45	133330	13,8	0,9	97,77	88
46	889000	24,0	0,9	98,8	2
47	588235	36,75	0,85	98,8	2
48	133330	13,8	0,9	97,77	88
49	195500	13,8	0,9	98,05	80
50	700	6,3	0,9	94,0	16
51	7500	10,5	0,8	97,6	2
52	15000	10,5	0,8	97,6	2
53	25000	6,3	0,8	97,6	2
54	203500	13,8	0,85	98,0	20
55	1111000	24,0	0,9	98,75	4
56	1333000	24,0	0,9	98,8	2
57	282500	15,75	0,85	98,4	48
58	590000	15,75	0,85	97,9	64
59	711000	15,75	0,9	98,3	42
60	889	6,3	0,9	94,5	16
61	25	0,4	0,9	86,0	6
62	37,5	0,23	0,9	88,2	6
63	25000	10,5	0,8	97,6	2
64	144440	10,5	0,9	98,1	32
65	1111000	24,0	0,9	98,75	2
67	1176400	27,0	0,9	98,71	2
68	127700	11,0	0,9	98,0	20
69	93,7	0,23	0,9	91,0	4
70	75	0,4	0,9	90,5	4
71	62,5	0,23	0,9	89,6	6
72	62,5	0,4	0,9	89,3	4
73	37,5	0,4	0,9	88,2	4
74	25	0,23	0,9	86,0	4
75	15	0,4	0,9	85,0	4

Продолжение табл. 2.6

1	2	3	4	5	6
76	10	0,23	0,9	84,7	4
77	62,5	0,4	0,9	90,0	4
78	31,5	0,23	0,9	88,0	4
79	25	0,4	0,9	87,0	4
80	6,25	0,4	0,9	80,2	4
81	15	0,23	0,9	86,0	4
82	500	3,2	0,9	92	10
83	700	6,3	0,9	93	6
84	450	0,4	0,9	91	8
85	780	6,3	0,9	93	6
86	600	3,2	0,9	93	12
87	230	0,7	0,9	90	10
88	470	6,3	0,9	91	6
89	270	0,4	0,9	90	10
90	400	3,2	0,9	92	8
91	330	6,3	0,9	92	6

Задача № 7. Трёхфазный синхронный генератор номинальной полной мощностью $S_{\text{ном}}$ и номинальным напряжением $U_{\text{Iном}}$ работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{\text{Iном}} = 0,8$ (инд.). Обмотка фазы статора имеет индуктивное сопротивление рассеяния x_1 и отношение короткого замыкания ОКЗ (табл. 2.7). Частота переменного тока 50 Гц.

Требуется построить практическую диаграмму ЭДС и по ней определить номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки. Активным сопротивлением фазы обмотки статора пренебречь. Характеристика холостого хода генератора нормальная.

Т а б л и ц а 2.7 – Данные для расчёта

№ варианта	$S_{\text{ном}},$ кВА	$U_{\text{Iном}},$ кВ	$\cos \varphi_{\text{Iн}}$	о.к.з., о.е.	$x_1,$ о.е.
1	2	3	4	5	6
1	78750	10,5	0,8	0,56	0,256

Продолжение табл. 2.7

1	2	3	4	5	6
2	137500	10,5	0,8	0,6	0,227
3	258800	15,75	0,85	0,52	0,246
4	376500	20,0	0,85	0,5	0,258
5	888900	24,0	0,9	0,51	0,29
6	115789	10,5	0,95	0,73	0,2
7	168421	15,7	0,95	0,82	0,17
8	231579	15,7	0,95	0,59	0,23
9	336842	20,0	0,95	0,52	0,26
10	115789	10,5	0,95	0,4	0,22
11	25	0,23	0,8	0,7	0,21
12	35	0,23	0,8	0,7	0,15
13	45	0,4	0,8	0,7	0,32
14	60	0,4	0,8	0,7	0,24
15	50	0,4	0,8	0,7	0,3
16	40	0,4	0,8	0,7	0,35
17	30	0,23	0,8	0,7	0,18
18	20	0,23	0,8	0,7	0,25
19	10	0,23	0,8	0,7	0,4
20	253000	15,75	0,85	0,7	0,137
21	206000	15,75	0,85	0,7	0,143
22	190000	15,75	0,9	0,7	0,174
23	150000	13,8	0,9	0,7	0,131
24	133330	13,8	0,9	0,7	0,093
25	203500	13,8	0,85	0,7	0,109
26	144440	10,5	0,9	0,7	0,143
27	127700	11,0	0,9	0,7	0,097
28	711000	15,75	0,9	0,7	0,184
29	590000	15,75	0,85	0,7	0,202
30	282500	15,75	0,85	0,7	0,173
31	253000	15,75	0,85	0,7	0,137
32	206000	15,75	0,85	0,7	0,143
33	195500	13,8	0,9	0,7	0,152
34	190000	15,75	0,9	0,7	0,174
35	150000	13,8	0,9	0,7	0,131
36	133330	13,8	0,9	0,7	0,093
37	91800	13,8	0,85	0,7	0,143
38	107000	13,8	0,8	0,7	0,117
39	68750	10,5	0,8	0,7	0,111
40	66700	11	0,9	0,7	0,084

Продолжение табл. 2.7

1	2	3	4	5	6
41	65500	10,5	0,8	0,7	0,096
42	63000	10,5	0,8	0,7	0,118
43	31250	10,5	0,8	0,7	0,119
44	31180	10,5	0,85	0,7	0,168
45	78750	10,5	0,8	0,56	0,256
46	137500	10,5	0,8	0,6	0,227
47	258800	15,75	0,85	0,52	0,246
48	376500	20,0	0,85	0,5	0,258
49	888900	24,0	0,9	0,51	0,29
50	115789	10,5	0,95	0,73	0,2
51	168421	15,7	0,95	0,82	0,17
52	231579	15,7	0,95	0,59	0,23
53	336842	20,0	0,95	0,52	0,26
54	115789	10,5	0,95	0,4	0,22
55	25	0,23	0,8	0,7	0,21
56	35	0,23	0,8	0,7	0,15
57	45	0,4	0,8	0,7	0,32
58	60	0,4	0,8	0,7	0,24
59	50	0,4	0,8	0,7	0,3
60	40	0,4	0,8	0,7	0,35
61	30	0,23	0,8	0,7	0,18
62	20	0,23	0,8	0,7	0,25
63	10	0,23	0,8	0,7	0,4
64	253000	15,75	0,85	0,7	0,137
65	206000	15,75	0,85	0,7	0,143
66	190000	15,75	0,9	0,7	0,174
67	150000	13,8	0,9	0,7	0,131
68	133330	13,8	0,9	0,7	0,093
69	203500	13,8	0,85	0,7	0,109
70	144440	10,5	0,9	0,7	0,143
71	127700	11,0	0,9	0,7	0,097
72	711000	15,75	0,9	0,7	0,184
73	590000	15,75	0,85	0,7	0,202
74	282500	15,75	0,85	0,7	0,173
75	253000	15,75	0,85	0,7	0,137
76	206000	15,75	0,85	0,7	0,143
77	195500	13,8	0,9	0,7	0,152
78	190000	15,75	0,9	0,7	0,174
79	150000	13,8	0,9	0,7	0,131

Продолжение табл. 2.7

1	2	3	4	5	6
80	133330	13,8	0,9	0,7	0,093
81	91800	13,8	0,85	0,7	0,143
82	107000	13,8	0,8	0,7	0,117
83	68750	10,5	0,8	0,7	0,111
84	66700	11	0,9	0,7	0,084
85	65500	10,5	0,8	0,7	0,096
86	63000	10,5	0,8	0,7	0,118
87	31250	10,5	0,8	0,7	0,119
88	31180	10,5	0,85	0,7	0,168
89	25	0,23	0,8	0,7	0,21
90	35	0,23	0,8	0,7	0,15
91	55	0,23	0,8	1,4	0,15

2.5. Примеры решения задач

Пример № 1. Используя данные трансформатора для варианта №91 (табл. 2.1), рассчитать электрические величины и параметры в соответствии с заданием задачи № 1, а также его КПД и напряжение на вторичной обмотке при нагрузке, равной 80% от номинальной и $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$).

Расчёт ведётся на фазу (число фаз $m = 3$).

Учитывая схему соединения обмоток, фазные первичное и вторичное напряжения

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{10500}{\sqrt{3}} = 6060\text{В},$$

$$U_{2\phi} = U_{2\text{НОМ}} = 690\text{В}.$$

Коэффициент трансформации трёхфазного трансформатора равен отношению фазных напряжений (высшего к низшему):

$$n = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{6060}{690} = 8,8.$$

Линейный коэффициент трансформации (зависит от схемы соединения обмоток)

$$n_{\text{л}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{10500}{690} = 15,2.$$

Линейный ток первичной обмотки (равный фазному)

$$I_{1\text{НОМ}} = I_{1\text{ф}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 88\text{А}.$$

Линейный ток вторичной обмотки

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 0,69} = 1339\text{А}.$$

Фазный ток вторичной обмотки

$$I_{2\text{ф}} = \frac{I_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{1340}{\sqrt{3}} = 774\text{А}.$$

Мощность потерь к. з. на фазу

$$P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{m} = \frac{16}{3} = 5,3\text{кВт}.$$

Фазное напряжение к. з. со стороны первичной обмотки

$$U_{1\text{кф}} = U_{1\text{ф}} \cdot U_{\text{к}} = 6060 \cdot 0,055 = 333\text{В}.$$

Параметры к. з.

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{кф}}}{I_{1\text{НОМ}}} = \frac{333}{88} = 3,8 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{кф}}}{I_{1\text{НОМ}}^2} = \frac{5300}{88^2} = 0,68 \text{ Ом}.$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2} = \sqrt{3,8^2 - 0,68^2} = 3,74 \text{ Ом}.$$

Активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{\text{к}}}{2} = \frac{0,68}{2} = 0,34 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{n^2} = \frac{0,34}{8,8^2} = 0,0044 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\text{к}}}{2} = \frac{3,74}{2} = 1,87 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{n^2} = \frac{1,87}{8,8^2} = 0,0241 \text{ Ом}.$$

Активная и реактивная составляющие напряжения к. з.

$$U_{\text{а}} = \frac{P_{\text{к}}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{I_{1\text{ф}} \cdot R_{\text{к}}}{U_{1\text{ф}}} \cdot 100 = \frac{16}{1600} \cdot 100 = 1\%;$$

$$U_p = \sqrt{(U_k)^2 - (U_a)^2} = \frac{I_{1\phi} X_k}{U_{1\phi}} \cdot 100 = \frac{88 \cdot 3,74}{6060} \cdot 100 = 5,4\%.$$

Мощность потерь х. х. на фазу

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{m} = \frac{4,2}{3} = 1,4 \text{ кВт.}$$

Фазный ток х. х.

$$I_{0\phi} = I_0 \cdot I_{1\phi} = 0,025 \cdot 88 = 2,2 \text{ А.}$$

Сопротивления ветви намагничивания

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{6060}{2,2} = 2755 \text{ Ом;}$$

$$R_0 = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{1400}{2,2^2} = 289 \text{ Ом;}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{2755^2 - 289^2} = 2740 \text{ Ом.}$$

Активная составляющая тока х. х.

$$I_{0a} = \frac{P_0}{S_{ном}} \cdot 100 = \frac{P_{0\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{ном}} \cdot 100 = \frac{4,2}{1600} \cdot 100 = 0,26\%.$$

Коэффициент мощности в режиме х. х.

$$\begin{aligned} \cos \varphi_0 &= \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot I_0} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{0\phi}} = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi} \cdot U_{1\phi}} = \frac{I_{0a}}{I_0} = \\ &= \frac{1400}{2,2 \cdot 6060} = 0,106; \quad \varphi_0 = 84^\circ. \end{aligned}$$

Угол потерь в стали

$$\alpha = \arcsin \frac{I_{0a}}{I_0} = 90^\circ - 84^\circ = 6^\circ.$$

Относительное изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки для $\beta = 0,8$, $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\Delta U_2 = \beta (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2), \quad (2.11)$$

$$\Delta U_2 = 0,8 (1 \cdot 0,8 + 5,4 \cdot 0,6) = 3,2\%.$$

Напряжение вторичной обмотки трансформатора для указанного режима работы

$$U_2 = U_{2\phi} \left(1 - \frac{\Delta U_2}{100} \right), \quad (2.12)$$

$$U_2 = 690 \left(1 - \frac{3,2}{100} \right) = 668 \text{ В.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \cdot 100 = \frac{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}, \quad (2.13)$$

где P_0 – потери х. х., равные сумме потерь мощности в стали сердечника на гистерезис в вихревые токи; $P_{\text{к}}$ – потери в меди при номинальном режиме (для нагрузки, отличной от номинальной, потери в меди $P_{\text{м}} = \beta^2 \cdot P_{\text{к}}$).

$$\eta = \frac{0,8 \cdot 1600 \cdot 0,8}{0,8 \cdot 1600 \cdot 0,8 + 4,2 + 0,8^2 \cdot 16} \cdot 100 = 98,6 \%$$

КПД достигает максимума при коэффициенте нагрузки

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к}}}} = \sqrt{\frac{4,2}{16}} = 0,5.$$

Токи аварийного к. з.

$$I_{1\text{к}} = \frac{U_{1\phi}}{Z_{\text{к}}} = \frac{U_{1\phi} \cdot I_{1\text{НОМ}}}{Z_{\text{к}} \cdot I_{1\text{НОМ}}} = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{\text{к}}} = \frac{88}{0,055} = 1600 \text{ А;}$$

$$I_{2\text{к}} = \frac{I_{2\text{НОМ}}}{U_{\text{к}}} = \frac{1339}{0,055} = 24345 \text{ А.}$$

Кратность токов аварийного к. з. по отношению к номинальным

$$\frac{I_{1\text{к}}}{I_{1\text{НОМ}}} = \frac{I_{2\text{к}}}{I_{2\text{НОМ}}} = \frac{1600}{88} = \frac{24345}{1339} = 18.$$

Реактивная мощность, необходимая для образования магнитного поля рассеяния первичной и вторичной обмоток,

$$Q_1 = 3 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot X_1 = 3 \cdot 88^2 \cdot 1,87 = 43,7 \text{ квар;}$$

$$Q_2 = 3 \cdot I_{2\phi}^2 \cdot X_2 = 3 \cdot 774^2 \cdot 0,0241 = 43,9 \text{ квар.}$$

Графики внешних характеристик, построенные по уравнениям (2.11), (2.12) при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$, и кривые КПД при $\beta = 0 \div 1,2$, построенные по уравнению (2.13), приведены на рис. 2.5.

Результаты расчётов сведены в табл. 2.6.

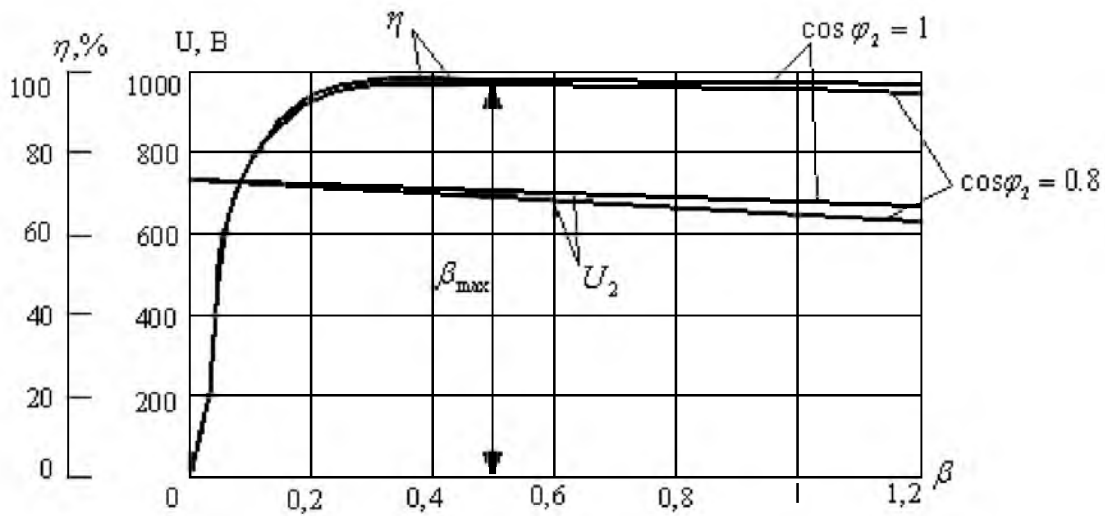


Рис. 2.5

Т а б л и ц а 2.6 – К расчёту характеристик $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$

β	$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$	
	$U_2, \text{В}$	$\eta, \%$	$U_2, \text{В}$	$\eta, \%$
0	690	0	690	0
0,2	688	98,52	685	98,16
0,4	686	98,95	679	98,71
0,6	685	98,97	674	98,71
0,8	684	98,89	668	98,61
1,0	684	98,77	661	98,45
1,2	682	98,61	656	98,27

Построение векторной диаграммы начинаем с фазного напряжения U_2 , приведённое значение которого для $\beta = 0,8$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ равно

$$U'_2 = U_2 \cdot n = 668 \cdot 8,8 = 5878 \text{ В.}$$

Выбрав масштаб напряжения $1 \text{ см} = 1000 \text{ В}$, отложим вектор U'_2 вертикально вниз от начала координат, оставив вверху место для других векторов. Вектор тока I'_2 отстаёт по фазе от U'_2 на заданный угол $\varphi_2 = \arccos 0,8 = 37^\circ$ и равен

$$I'_2 = 0,8 \cdot \frac{I_{2\phi}}{n} = 0,8 \cdot \frac{774}{8,8} = 70 \text{ А.}$$

Выбрав масштаб тока $1 \text{ см} = 30 \text{ А}$, отложим вектор I'_2 , который отстаёт от вектора U'_2 на угол $\varphi_2 = 37^\circ$.

Определим значения активной и реактивной составляющих падения напряжения на вторичной обмотке:

$$I'_2 \cdot R'_2 = 70 \cdot 0,34 = 23,8 \text{ В;}$$

$$I'_2 \cdot X'_2 = 70 \cdot 1,87 = 131 \text{ В.}$$

Из конца вектора U'_2 отложим в масштабе напряжения параллельно току I'_2 вектор $R'_2 I'_2$ и перпендикулярно току I'_2 вектор $I'_2 X'_2$.

Соединив конец этого вектора с началом координат, получим вектор ЭДС взаимной индукции $E'_2 = E_1$. Её значение $E_1 = 6 \text{ см} \cdot 1000 \text{ В/см} = 6000 \text{ В}$.

Под углом 90° в сторону опережения вектора E_1 отложим вектор магнитного потока Φ_m произвольной длины. Ток х. х. $I_{0\phi}$ опережает вектор Φ_m на угол потерь в стали $\alpha = 6^\circ$; его длина равна $I_{0\phi} = 2,2 / 30 \text{ А/см} = 0,7 \text{ мм}$. Ток в первичной обмотке получаем из уравнения $I_1 = I_0 + (-I'_2)$.

Током х. х. можно пренебречь (если он мал) и принять $I_1 = I'_2$.

Вектор напряжения первичной обмотки трансформатора $U_{1\phi}$ получаем из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа для первичной цепи:

$$U_1 = -E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1,$$

где падение напряжения на первичной обмотке

$$R_1 I_1 = 0,34 \cdot 88 = 30 \text{ В;}$$

$$X_1 I_1 = 1,87 \cdot 88 = 165 \text{ В.}$$

Его значение, полученное из векторной диаграммы, должно составлять: $U_{1\phi} \approx 6060 \text{ В}$.

Векторная диаграмма трансформатора приведена на рис. 2.6. Т-образная схема замещения показана на рис. 2.7.

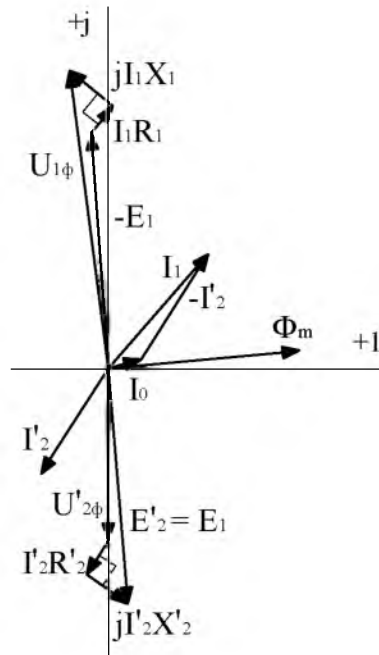


Рис. 2.6

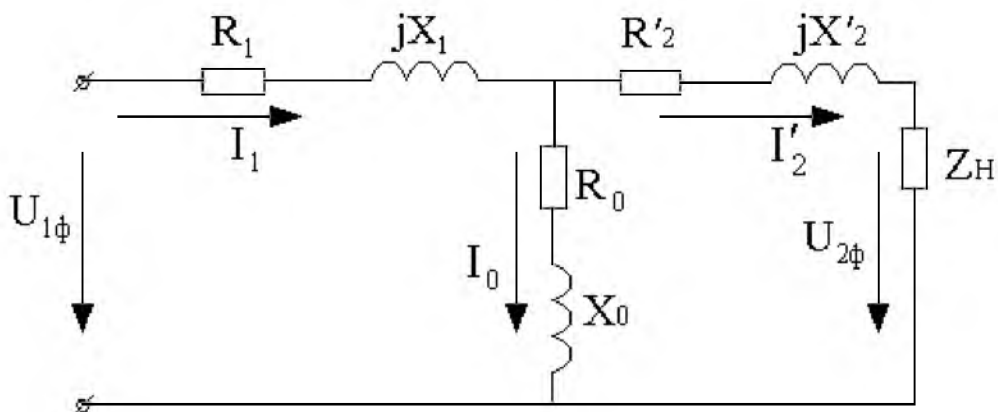


Рис. 2.7

Пример №2. Для асинхронного двигателя 4А250М6УЗ мощностью 55 кВт по паспортным данным (вариант №91, табл. 2.2) рассчитать электромеханические характеристики в соответствии с заданием задачи №2.

Номинальная частота вращения

$$n_{2\text{НОМ}} = n_0 (1 - s_n) = 1000 \cdot (1 - 0,015) = 985 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальный вращающий момент на валу определяем из соотношения

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_2}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_{\text{НОМ}}},$$

где $\omega_{\text{НОМ}} = 2\pi n_{\text{НОМ}}/60$ – угловая скорость вращения ротора, с^{-1}

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{55 \cdot 10^3}{985} = 533 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поскольку в условии указаны кратности моментов $M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}} = 1,2$ и $M_{\text{МАХ}}/M_{\text{НОМ}} = 2$, находим пусковой момент

$$M_{\text{П}} = M_{\text{НОМ}} \cdot 1,2 = 533 \cdot 1,2 = 640 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный (критический) момент

$$M_{\text{МАХ}} = M_{\text{НОМ}} \cdot 2 = 533 \cdot 2 = 1066 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По условию двигатель включается в сеть на напряжение 220 В (см. табл. 2.3). При этом статорную обмотку следует включать по схеме «треугольник», тогда фазное напряжение $U_{\text{Ф}} = U_{\text{Л}} = 220 \text{ В}$.

Для симметричной трёхфазной цепи включения обмотки статора потребляемая из сети активная мощность

$$P_1 = 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot I_{\text{Ф}} \cdot \cos\varphi \quad \text{или} \quad P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos\varphi,$$

где φ – угол между напряжением и током обмотки статора; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности двигателя по отношению к первичной сети.

Потребляемая из сети асинхронным двигателем мощность P_1 больше полезной механической мощности, передаваемой через вал рабочей машине P_2 , на величину суммарных потерь в двигателе (электрических, магнитных, механических и добавочных).

Подставляя данные из условия, находим:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{55}{0,92} = 59,8 \text{ кВт}.$$

Тогда линейный ток обмотки статора (в данной схеме $I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$) при номинальной нагрузке

$$I_{\text{л ном}} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} = \frac{59800}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,88} = 178,3 \text{ А.}$$

При этом потребляемые из сети полная и реактивная мощности

$$S_{\text{I ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 178,3 = 6794 \text{ В} \cdot \text{А} \approx 67,9 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

$$Q_{\text{I ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 178,3 \cdot 0,47 \approx 31,9 \text{ квар.}$$

Пусковой ток

$$I_{\text{п}} = I_{\text{л ном}} \cdot \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}} = 178,3 \cdot 7 = 1248 \text{ А.}$$

Для расчёта критического скольжения $s_{\text{кр}}$ воспользуемся формулой Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (2.14)$$

Вместо текущих значений s и M подставим в (2.14) их номинальные значения $s_{\text{ном}}$ и $M_{\text{ном}}$, обозначив отношение $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = \lambda$,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}}} \quad \text{или} \quad \frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}} = 2\lambda. \quad (2.15)$$

Приведя к общему знаменателю левую часть уравнения (2.15), получим квадратное уравнение:

$$\frac{s_{\text{ном}}^2 + s_{\text{кр}}^2}{s_{\text{кр}} \cdot s_{\text{ном}}} = 2\lambda \quad \text{или} \quad s_{\text{кр}}^2 - 2 \cdot s_{\text{кр}} \cdot s_{\text{ном}} \cdot \lambda + s_{\text{ном}}^2 = 0. \quad (2.16)$$

Находим $s_{\text{кр}}$ как положительный корень уравнения (2.16), поскольку $s_{\text{кр}}$ всегда больше $s_{\text{ном}}$.

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \cdot \lambda \pm \sqrt{s_{\text{ном}}^2 \cdot \lambda^2 + s_{\text{ном}}^2} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

$$s_{\text{кр}} = 0,015 \cdot (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,056.$$

$$\text{При этом } n_{\text{кр}} = n_0 \cdot (1 - s_{\text{кр}}) = 1000 \cdot (1 - 0,056) = 944 \text{ мин}^{-1}.$$

Задаваясь значениями n от 0 до 1000 мин^{-1} , находим ряд значений M по формуле (2.14) и строим механическую характеристику двигателя. Результаты расчёта приведены в табл. 2.7, механическая характеристика двигателя – на рис. 2.8.

Т а б л и ц а 2.7 – Результаты расчёта механической характеристики

$n, \text{мин}^{-1}$	0	400	800	900	$n_{кр}=944$	960	$n_{2 \text{ ном}}=985$	1000
$s, \text{отн.ед.}$	1,0	0,6	0,2	0,1	$s_{кр}=0,056$	0,04	$s_{ном}=0,015$	0
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	117	198	554	912	1068	1010	534	0

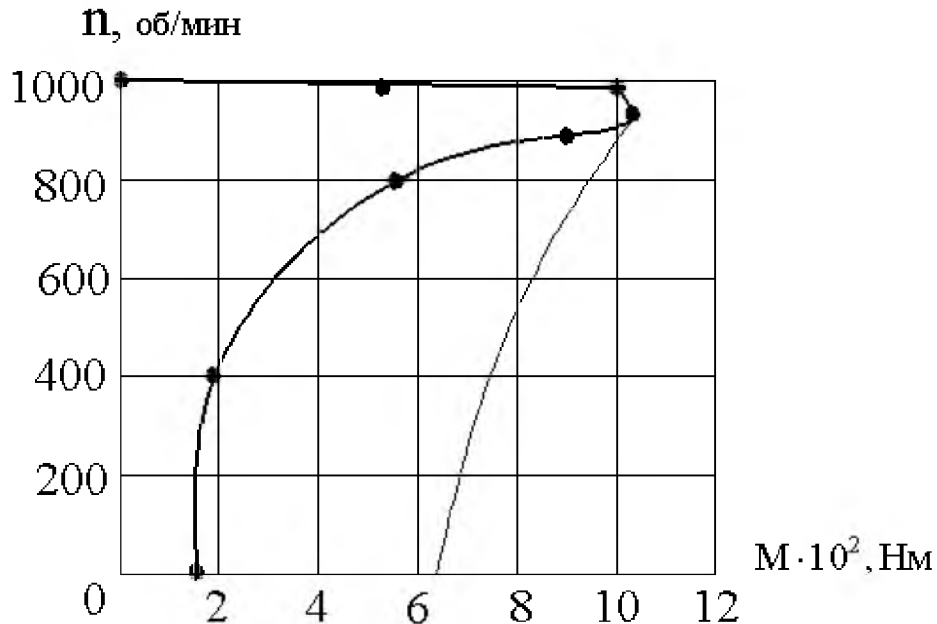


Рис. 2.8

Расчёт по формуле Клосса даёт хорошее приближение только в рабочей части механической характеристики, т. е. для n от n_0 до $n_{кр}$. Пусковая часть характеристики описывается этой приближённой формулой с большой погрешностью. Для построения истинной механической характеристики необходимо соединить точку $M_{п} = 640 \text{ Н}\cdot\text{м}$ с точкой, соответствующую критическому скольжению (пунктирная линия на рис. 6).

Пример №4. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением типа 2ПН160ЛУХЛ4 мощностью 6,7 кВт (вариант №91, табл. 2.4) рассчитать параметры и построить механические характеристики по заданию задачи №4.

Номинальный полезный момент на валу

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 6,7 \cdot 10^3}{3000} = 21,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Ток, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке,

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_2}{\eta \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{6,7 \cdot 10^3}{0,86 \cdot 220} = 35,4 \text{ А}.$$

Этот ток складывается из тока якоря и тока обмотки возбуждения:

$$I_{\text{НОМ}} = I_{\text{Я НОМ}} + I_{\text{В НОМ}},$$

где ток возбуждения
$$I_{\text{В НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{В}}} = \frac{220}{138} = 1,6 \text{ А}.$$

Магнитный поток двигателя при токе $I_{\text{В НОМ}}$ называется номинальным и обозначается $\Phi_{\text{НОМ}}$. В то же время этот поток является максимальным для данного двигателя и по условию не зависит от тока якоря.

Номинальный ток якоря

$$I_{\text{Я НОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{В НОМ}} = 35,4 - 1,6 = 33,8 \text{ А}.$$

Пусковой ток, протекающий через цепь якоря при прямом пуске ($R_{\text{П}} = 0$),

$$I_{\text{П}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{а}} + R_{\text{дп}}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{я}}} = \frac{220}{0,12 + 0,089} = 1053 \text{ А},$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, включающее сопротивление обмотки якоря и обмотки добавочных полюсов, $R_{\text{я}} = R_{\text{а}} + R_{\text{дп}} = 0,209 \text{ Ом}$.

Кратность пускового тока при прямом пуске

$$\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{Я НОМ}}} = \frac{1053}{33,8} = 31,2.$$

Запишем основные уравнения для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Электродвижущая сила (ЭДС)

$$E = U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}. \quad (2.17)$$

ЭДС можно выразить через угловую скорость вращения $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ (с⁻¹) и магнитный поток Φ (Вб):

$$E = C\Phi\omega, \quad (2.18)$$

где C – конструктивный фактор, зависящий от числа проводников и способа выполнения обмотки, $C = \text{const}$.

Подставив (2.18) в (2.17), получим уравнение скоростной характеристики

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C\Phi} = \omega_0 - \frac{I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C\Phi}, \quad (2.19)$$

где ω_0 – угловая скорость вращения идеального х. х.

Развиваемый якорем вращающий электромагнитный момент включает в себя полезный момент на валу M и момент потерь х. х. M_0 :

$$M_{\text{ЭМ}} = C \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = M + M_0. \quad (2.20)$$

Подставив $I_{\text{я}}$ из (2.20) в (2.19), получим уравнение механической характеристики двигателя:

$$\omega = \omega_0 - (M + M_0) \cdot \frac{R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2}. \quad (2.21)$$

Механическая характеристика называется естественной, если в цепях якоря и обмотки возбуждения отсутствуют внешние сопротивления и если двигатель подключен к сети с номинальным напряжением. Все остальные характеристики называются искусственными. При принятых выше допущениях все механические характеристики линейны.

Уравнение (2.19) для номинального режима можно переписать в виде:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я НОМ}} \cdot R_{\text{я}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}},$$

откуда можно определить произведение $C\Phi_{\text{НОМ}}$, которое измеряется в Веберах (поскольку C – величина безразмерная) и представляет собой потокосцепление обмотки с магнитным полем,

$$C\Phi_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я НОМ}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 33,8 \cdot 0,209}{314} = 0,678 \text{ Вб}.$$

Для построения естественной характеристики $\eta = f(M)$ достаточно знать координаты двух её точек:

– для номинального режима (они известны)

$$M = M_{\text{ном}} = 21,3 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad \text{и} \quad n = n_{\text{ном}} = 3000 \text{ мин}^{-1};$$

– для режима идеального холостого хода ($M + M_0 = 0$)

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{C\Phi_{\text{ном}}} = \frac{220}{0,678} = 324,5 \text{ с}^{-1}.$$

Переводим угловую скорость вала (с^{-1}) в частоту вращения (мин^{-1}):

$$n_0 = \frac{30 \cdot \omega_0}{\pi} = \frac{30 \cdot 324,5}{3,14} = 3100 \text{ мин}^{-1}.$$

Так как по оси абсцисс откладывается полезный момент на валу M , скорость вращения ω_0 будет соответствовать моменту $M = -M_0$, т. е. момент меняет знак и превращается в тормозной. Следовательно, чтобы достичь режима идеального холостого хода надо принудительно раскрутить вал двигателя выше скорости реального х. х. и преодолеть момент M_0 (при этом $E = U_{\text{ном}}$, $I_{\text{я}} = 0$).

Момент потерь х. х. равен разности между электромагнитным моментом, развиваемым двигателем в номинальном режиме, и полезным моментом на валу.

$$M_{\text{Э ном}} = C\Phi_{\text{ном}} I_{\text{я ном}} = 0,678 \cdot 33,8 = 22,92 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_0 = M_{\text{Э ном}} - M_{\text{ном}} = 22,92 - 21,3 = 1,62 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По условию задачи $M_0 = \text{const}$. Отложив величину момента M_0 влево от начала координат, проводим на этом расстоянии прямую, параллельную оси ординат, и на ней откладываем частоту вращения $n_0 = 3100 \text{ мин}^{-1}$. Соединив эту точку с точкой номинального режима, получим естественную механическую характеристику (прямая 1, рис. 2.9).

Определим баланс потерь в двигателе для номинального режима.

Электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} = 35,4 \cdot 220 = 7,79 \text{ кВт}.$$

Электрические потери в меди обмотки возбуждения и цепи якоря (на нагревание)

$$\Delta P_{\text{мв}} = I_{\text{в ном}}^2 \cdot R_{\text{в}} = 1,6^2 \cdot 138 = 353 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\text{мя}} = I_{\text{я ном}}^2 \cdot R_{\text{я}} = 33,8^2 \cdot 0,209 = 239 \text{ Вт}.$$

Электромагнитная мощность, развиваемая якорем,

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{э ном}} \cdot \omega_{\text{ном}} = 22,92 \cdot 314 = 7197 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь в стали и механических (потери х. х.)

$$\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} = M_0 \cdot \omega_{\text{ном}} = 1,62 \cdot 314 = 509 \text{ Вт}.$$

Энергетическая диаграмма двигателя приведена на рис. 2.10.

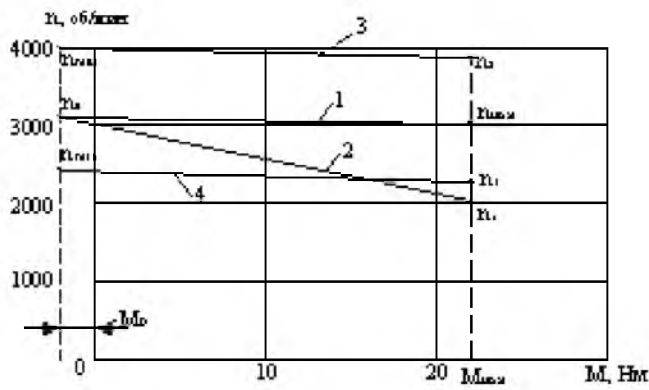


Рис. 2.9

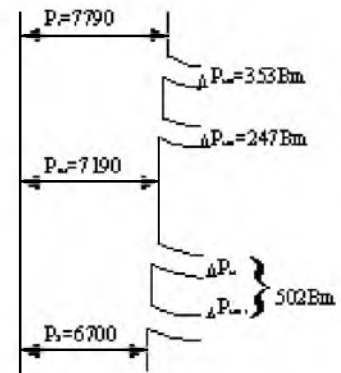


Рис. 2.10

Рассчитаем искусственную механическую характеристику с сопротивлением $R_{\text{п}}$ в цепи якоря. Поскольку при пуске ЭДС равна нулю и по условию $I_{\text{п}} = 3I_{\text{я ном}}$, из (2.17) имеем:

$$I_{\text{п}} = 3 \cdot I_{\text{я ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}, \text{ откуда}$$

$$R_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}}}{3 \cdot I_{\text{я ном}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{3 \cdot 33,8} - 0,209 = 1,96 \text{ Ом}.$$

Пусковой момент на валу при пуске двигателя с реостатом $R_{\text{п}}$ будет равен электромагнитному за вычетом момента х. х.:

$$M_{\text{п}} = C\Phi_{\text{ном}} I_{\text{п}} - M_0 = 0,678 \cdot 3 \cdot 33,8 - 1,62 = 67,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для $M = M_{\text{ном}}$ ток якоря $I_{\text{я}} = I_{\text{я ном}}$ и скорость вращения вала двигателя с пусковым сопротивлением $R_{\text{п}} = 1,96 \text{ Ом}$ будет равна

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{Я НОМ}}(R_{\text{Я}} + R_{\text{П}})}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 33,8 \cdot (0,209 + 1,96)}{0,678} = 216 \text{ с}^{-1},$$

$$(n_1 = 2063 \text{ мин}^{-1}).$$

Для $M = -M_0$ скорость вращения $\omega_{01} = \omega_0 = 324,5 \text{ с}^{-1}$ ($n_0 = 3100 \text{ с}^{-1}$), поскольку все характеристики с любым $R_{\text{П}}$ в цепи якоря, пересекаются в точке идеального х. х. Соединим эти точки прямой линией (прямая 2, рис. 2.9).

Построим искусственную механическую характеристику при включении регулировочного реостата $R_{\text{Р}}$ в цепь обмотки возбуждения и номинальном напряжении питания $U_{\text{НОМ}}$.

Исходя из (2.17), в режиме идеального х. х. отношение частоты вращения х. х. к максимальной (заданной в каталоге) обратно пропорционально отношению потоков:

$$\frac{n_0}{n_{0 \text{ max}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0 \text{ max}}} = \frac{C\Phi_{\text{min}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}}.$$

Необходимое ослабление магнитного потока по отношению к номинальному

$$\frac{\Phi_{\text{min}}}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{3100}{4000} = 0,775.$$

По кривой намагничивания для $\Phi_{\text{min}} / \Phi_{\text{НОМ}} = 0,775$ находим относительное значение тока возбуждения

$$\frac{I_{\text{В min}}}{I_{\text{В ном}}} = 0,55.$$

Тогда

$$I_{\text{В min}} = 0,55 \cdot I_{\text{В ном}} = 0,55 \cdot 1,6 = 0,88 \text{ А}.$$

Регулировочное сопротивление $R_{\text{Р}}$, которое необходимо ввести в цепь возбуждения для получения $\omega_{0 \text{ max}}$ ($n_{0 \text{ max}}$),

$$R_{\text{Р}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{В min}}} - R_{\text{В}} = \frac{220}{0,88} - 138 = 112 \text{ Ом}.$$

Угловую скорость вращения двигателя с уменьшенным потоком для $M = M_{\text{НОМ}}$ находим по (2.21):

$$\omega_2 = \omega_{0 \text{ max}} - (M_{\text{НОМ}} + M_0) \cdot \frac{R_{\text{Я}}}{\left(C\Phi_{\text{НОМ}} \cdot \frac{\Phi_{\text{min}}}{\Phi_{\text{НОМ}}} \right)^2} =$$

$$= 419 - (21,3 + 1,62) \cdot \frac{0,209}{(0,678 \cdot 0,775)^2} = 401,7 \text{ с}^{-1},$$

$$(n_2 = 3835 \text{ мин}^{-1}).$$

Проводим на графике через эти две точки механическую характеристику двигателя при ослабленном потоке (прямая 3, рис. 2.9).

Рассчитаем механическую характеристику при напряжении питания цепи якоря $U_{\text{Я}} = 0,8U_{\text{НОМ}}$.

Скорость вращения идеального х. х. ($M = -M_0$)

$$\omega_{0 \text{ min}} = \frac{0,8 \cdot U_{\text{НОМ}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,8 \cdot 220}{0,678} = 260 \text{ с}^{-1},$$

$$(n_{0 \text{ min}} = 2483 \text{ мин}^{-1}).$$

Угловая скорость вращения при номинальном моменте ($M = M_{\text{НОМ}}$)

$$\omega_3 = \omega_{0 \text{ min}} - \frac{I_{\text{ЯНОМ}} R_{\text{Я}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = 260 - \frac{33,8 \cdot 0,209}{0,678} = 249,6 \text{ с}^{-1},$$

$$(n_3 = 2385 \text{ с}^{-1}).$$

Построим по этим двум точкам характеристику при $U_{\text{Я}} = 0,8U_{\text{НОМ}}$ (прямая 4, рис. 2.9).

Потери мощности в дополнительных сопротивлениях:

– при регулировании частоты вращения вверх от номинальной ослаблением потока (полюсное управление)

$$\Delta P = I_{\text{В min}}^2 \cdot R_{\text{П}} = 0,88^2 \cdot 112 = 86,7 \text{ Вт};$$

– при регулировании частоты вращения вниз от номинальной введением сопротивления $R_{\text{П}}$ в цепь якоря (якорное управление)

$$P_{\text{П}} = I_{\text{ЯНОМ}}^2 \cdot R_{\text{П}} = 33,8^2 \cdot 1,96 = 2239 \text{ Вт}.$$

Таким образом, первый способ регулирования значительно экономичнее второго. Ещё более экономичным является третий способ, но для этого необходимо питать цепь якоря от независимого источника энергии с регулируемым напряжением.