

Министерство сельского хозяйства РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт Энергетики и природопользования

Безик В.А.

Электрический привод

Учебно-методическое пособие
по выполнению практических работ

Брянская область
2024

УДК 62-83 (076)
ББК 31.291
Б 39

Безик, В. А. **Электрический привод**: учебно-методическое пособие по выполнению практических работ / В. А. Безик. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2024. – 68 с.

Учебно-методическое пособие содержит примеры выполнения задач и контрольные задания по разделам электрического привода. Предназначено для использования на практических занятиях и самостоятельной работе по дисциплине «Электрический привод». Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров направлений: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 Агроинженерия.

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры Автоматики, физики и математики Погоньшев В.А. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ),

к.т.н., доцент кафедры технического сервиса Романеев Н.А. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 3 от 29.01.2024 года.

© Брянский ГАУ, 2024
© Безик В.А., 2024

Содержание

Введение	4
1 Приводные свойства электроприводов	5
1.1 Примеры решения задач	5
1.2 Контрольные задания	13
2 Реостатный пуск электродвигателей	16
2.1 Примеры решения задач	16
2.2 Контрольные задания	20
3 Механика и динамика электропривода	23
3.1 Примеры решения задач	23
3.2 Контрольные задания	37
4 Режимы работы, выбор электродвигателя	43
4.1 Примеры решения задач	43
4.2 Расчет нагрузки привода для некоторых производственных механизмов	48
4.3 Задачи для самостоятельного решения	52
4.4 Контрольные задания	55
5 Проверка возможности пуска и устойчивости работы электродвигателей	59
5.1 Примеры решения задач	59
5.2 Контрольные задания	62
Литература	64
Приложение	65

Введение

Электрический привод (сокращённо – Электропривод) – это электромеханическая система для приведения в движение исполнительных механизмов рабочих машин и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. Современный электропривод – это совокупность множества электромашин, аппаратов и систем управления ими. Он является основным потребителем электрической энергии (до 60%) и главным источником механической энергии в промышленности.

Достоинства электрического привода:

- мощность электродвигателя для привода рабочей машины может быть подобрана достаточно близкой к требуемой;
- электрический двигатель в пожарном отношении менее опасен, чем, например, тепловой двигатель внутреннего сгорания;
- электропривод позволяет быстро, а если нужно, то и часто, пускать и останавливать машину, плавно тормозить ее;
- при изменении нагрузки на валу электродвигатель не требует специальных регуляторов подачи электроэнергии из сети. Увеличение подводимой к двигателю электроэнергии происходит автоматически с ростом нагрузки;
- электропривод позволяет подобрать такой тип электродвигателя, механическая характеристика которого лучше, чем других двигателей, подходит к характеристике рабочей машины;
- электрический двигатель способен преодолевать длительные и значительные перегрузки, создаваемые рабочей машиной;
- электрический двигатель позволяет экономить электроэнергию, а в отдельных случаях, при рекуперативном торможении, отдавать ее в электрическую сеть;
- при электроприводе можно проще и полнее автоматизировать машины и установки;
- электродвигатель имеет более высокий к.п.д. по сравнению с другими типами двигателей.

Современный электропривод, как правило, автоматизирован. Автоматическая система управления электроприводом позволяет наиболее рационально построить технологический процесс, повысить производительность труда, улучшить качество продукции и снизить ее себестоимость. Для рациональной эксплуатации необходимо хорошо знать электротехнику, свойства и схему электродвигателей, аппаратов и приборов, основы электропривода, схемы управления электроприводом и его автоматизации, а также электрооборудование гидромелиоративных машин.

Предлагаемое пособие содержит ряд задач, охватывающих различные вопросы, связанные с выбором и расчетом параметров и характеристик электроприводов.

1 Приводные свойства электроприводов

1.1 Примеры решения задач

Задача 1.

Для двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения, используя следующие его паспортные данные: $P_H = 2,5$ кВт; $U_H = 110$ В; $\eta_H = 72\%$; $n_H = 1000$ мин⁻¹, построить естественную механическую характеристику, искусственную характеристику с добавочным сопротивлением в цепи якоря $R_d = 0,4 R_{ном}$, искусственную характеристику с уменьшенным магнитным потоком $\Phi = 0,8 \Phi_H$, искусственную характеристику при напряжении якоря $U = 0,8 U_H$.

Решение:

Номинальный ток электродвигателя I_H , А:

$$I_H = 1000 \frac{P_H}{U_H \cdot \eta_H},$$
$$I_H = 1000 \frac{2,5}{110 \cdot 0,72} = 31,6 \text{ А.}$$

Номинальное сопротивление электродвигателя R_H , Ом:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H},$$
$$R_H = \frac{110}{31,6} = 3,48 \text{ Ом.}$$

Сопротивление якоря $R_я$, Ом:

$$R_я = 0,5(1 - \eta_H)R_H,$$
$$R_я = 0,5 \cdot (1 - 0,72) \cdot 3,48 = 0,487 \text{ Ом.}$$

Номинальный вращающий момент M_H , Н · м, на валу электродвигателя:

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H},$$
$$M_H = 9,55 \frac{2800}{1000} = 23,8 \text{ Н · м.}$$

Коэффициент ЭДС:

$$c_e = \frac{U_H - I_H R_{я}}{n_H},$$

$$c_e = \frac{110 - 31,6 \cdot 0,487}{1000} = 0,095 \text{ В} \cdot \text{мин}^{-1}.$$

Частота идеального холостого хода n_0 , мин^{-1} , при номинальном напряжении

$$n_0 = \frac{U_H}{c_e},$$

$$n_0 = \frac{110}{0,095} = 1158 \text{ мин}^{-1}.$$

Механическая характеристика ДПТ параллельного или независимого возбуждения при $U = const$; $\Phi = const$; $R = const$ представляет собой прямую линию. Для ее построения достаточно двух точек.

Естественную механическую характеристику строим по точкам: идеального холостого хода

$$n_0 = 1158 \text{ мин}^{-1}, M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

номинальной

$$n_H = 1000 \text{ мин}^{-1}, M_H = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При введении добавочного сопротивления в цепь якоря возрастает падение скорости под нагрузкой. Вычислим частоту вращения при номинальном моменте и введенном добавочном сопротивлении

$$R_d = 0,4 R_{ном} = 0,4 \cdot 3,48 = 1,392 \text{ Ом},$$

$$n_1 = \frac{U_H}{c_e} - \frac{R_{я} + R_{доб}}{9,55 c_e^2} M_H,$$

$$n_1 = \frac{110}{0,095} - \frac{0,487 + 1,392}{9,55 \cdot 0,095^2} 23,8 = 639 \text{ мин}^{-1}.$$

Искусственную механическую характеристику с введенным добавочным сопротивлением $R_d = 0,4 R_{ном}$ строим по точкам: идеального холостого хода

$$n_0 = 1158 \text{ мин}^{-1}, M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

НОМИНАЛЬНОГО МОМЕНТА

$$n_H = 639 \text{ мин}^{-1}, M_H = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Изменение магнитного потока приводит к изменению как частоты идеального холостого хода, так и падению скорости под нагрузкой

Т.к.

$$c_e = \frac{c \Phi}{9,55}$$

Снижение потока до $\Phi = 0,8 \Phi_H$, приведет к такому же снижению коэффициента ЭДС

$$c_{e1} = 0,8 c_e = 0,8 \cdot 0,095 = 0,076 \text{ мин}^{-1}.$$

Тогда частота идеального холостого хода

$$n_{02} = \frac{U_H}{c_{e1}}$$

$$n_{02} = \frac{110}{0,076} = 1447 \text{ мин}^{-1}.$$

Частота вращения при номинальном моменте

$$n_2 = \frac{U_H}{c_{e2}} - \frac{R_{я}}{9,55 c_{e2}^2} M_H,$$

$$n_2 = \frac{110}{0,076} - \frac{0,487}{9,55 \cdot 0,076^2} 23,8 = 1237 \text{ мин}^{-1}.$$

Искусственную механическую характеристику с уменьшенным магнитным потоком строим по точкам:

идеального холостого хода

$$n_{02} = 1447 \text{ мин}^{-1}, M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

НОМИНАЛЬНОГО МОМЕНТА

$$n_2 = 1237 \text{ мин}^{-1}, M_H = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При снижении напряжения якорной цепи до $U = 0,8 U_H$ частота идеального холостого хода

$$n_{03} = \frac{0,8 U_H}{c_e},$$

$$n_{03} = \frac{0,8 \cdot 110}{0,095} = 926 \text{ мин}^{-1}.$$

Частота вращения при номинальном моменте

$$n_3 = \frac{0,8 U_H}{c_e} - \frac{R_{\text{я}}}{9,55 c_e^2} M_H,$$

$$n_3 = \frac{0,8 \cdot 110}{0,095} - \frac{0,487}{9,55 \cdot 0,095^2} 23,8 = 800 \text{ мин}^{-1}.$$

Искусственную механическую характеристику с уменьшенным напряжением якорной цепи строим по точкам:

идеального холостого хода

$$n_{03} = 926 \text{ мин}^{-1}, M = 0 \text{ Н м},$$

номинального момента

$$n_3 = 800 \text{ мин}^{-1}, M_H = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

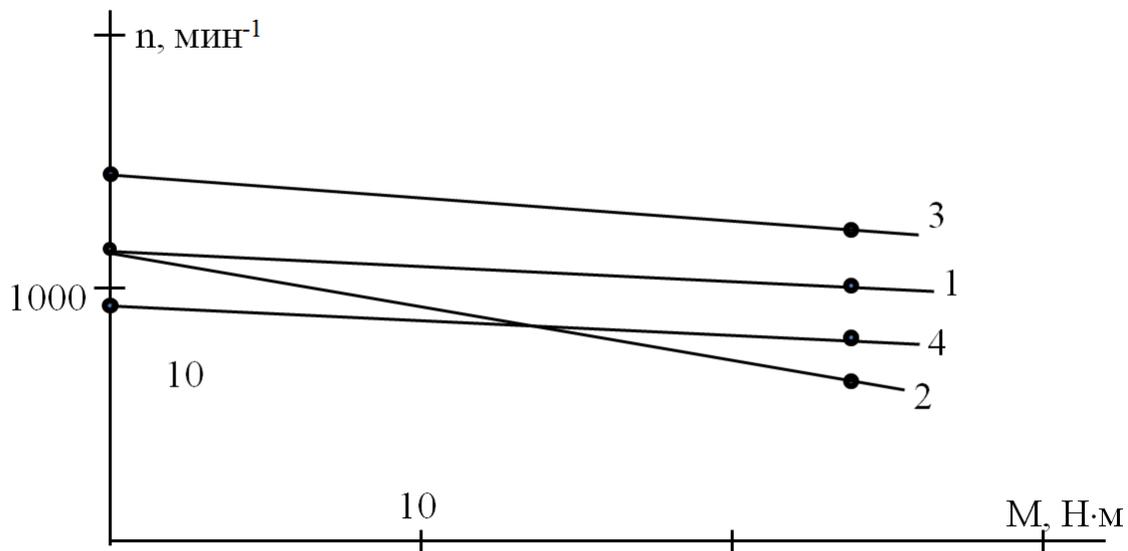


Рисунок 1.1 - Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения: 1 – естественная, 2 – с добавочным сопротивлением в цепи якоря, 3 – с уменьшенным магнитным потоком, 4 – с пониженным напряжением якорной цепи

Задача 2.

Рассчитать и построить естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя и искусственную механическую характеристику с уменьшенным на 10% от номинального напряжением питания. Параметры двигателя приведены в таблице 1.1:

Таблица 1.1 - Параметры электродвигателя

Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , мин ⁻¹	Ток статора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos\varphi_n$	$\frac{I_{\Pi}}{I_n}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$
АИР112М4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5

Решение:

Произведем расчет механической характеристики двигателя. Вычислим значения момента и частоты вращения в характерных точках характеристики:

Синхронная точка.

Скорость двигателя равна синхронной

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

где f – частота токов статора,
 p – число пар полюсов статора.

$$n_1 = (60 \cdot 50) / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Момент двигателя равен 0.

Номинальная точка.

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_1(1 - s_n),$$

где s_n – номинальное скольжение.

$$n_n = 1500 \cdot (1 - 0,05) = 1425 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальный момент рассчитывается по формуле

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n},$$

где P_n – номинальная мощность двигателя,
 n_n – номинальная частота вращения ротора.

$$M_H = 9,55 \cdot (5500/1425) = 36,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критическая точка.

критическое скольжение

$$s_K = s_H \left(\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1} \right),$$

$$s_K = 0,05 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,21.$$

Критическая частота вращения

$$n_K = n_l (1 - s_K),$$

$$n_K = 1500 \cdot (1 - 0,21) = 1185 \text{ мин}^{-1}.$$

Критический момент

$$M_K = \mu_K M_H,$$

где $\mu_K = \frac{M_{\text{макс}}}{M_H}$ – кратность критического момента (из паспортных данных двигателя).

$$M_K = 2,2 \cdot 36,9 = 81,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Точка минимального момента.

Минимальный момент определяется по формуле

$$M_{\text{min}} = \mu_{\text{min}} M_H,$$

где $\mu_{\text{min}} = \frac{M_{\text{min}}}{M_H}$ – кратность минимального момента (из паспортных данных).

$$M_{\text{min}} = 1,6 \cdot 36,9 = 59 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Частота вращения в минимального точке приблизительно равна 20% от синхронной.

$$n_{\text{min}} = 0,2 \cdot 1500 = 300 \text{ мин}^{-1}.$$

Пусковая точка.

Частота вращения в пусковой точке равно 0. Момент рассчитывается по формуле

$$M_n = \mu_n M_H,$$

где $\mu_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$ - кратность пускового момента (из паспортных данных).

$$M_{\text{п}} = 2,0 \cdot 36,9 = 73,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Дополнительно к этим точкам рассчитаем еще три, используя упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2 M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}}.$$

Скольжение в первой точке возьмем приблизительно равным половине от номинального, во второй и третьей точках приблизительно равномерно между номинальным и критическим.

$$s_1 = 0,025; s_2 = 0,1; s_3 = 0,15;$$

Соответствующие им частоты вращения

$$n_1 = 1500 \cdot (1 - 0,025) = 1463 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_2 = 1500 \cdot (1 - 0,1) = 1350 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_3 = 1500 \cdot (1 - 0,15) = 1275 \text{ мин}^{-1}.$$

Моменты в точках

$$M_1 = (2 \cdot 81,2) / (0,025/0,21 + 0,21/0,025) = 18,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_2 = (2 \cdot 81,2) / (0,1/0,21 + 0,21/0,1) = 62,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_3 = (2 \cdot 81,2) / (0,15/0,21 + 0,21/0,15) = 77,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Данные расчетов сведем в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
$n, \text{ мин}^{-1}$	1500	1463	1425	1350	1275	1185	500	0
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	0	18,9	36,9	62,5	77,3	81,2	59	73,8
$M_{\text{к}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	0	15,3	29,9	50,6	62,6	65,8	47,8	59,8

По рассчитанным данным строим механическую характеристику (рисунок 1.2).

Т.к. момент развиваемый двигателем пропорционален квадрату напряжения, для построения характеристики с уменьшенным напряжением питания пересчитываем моменты по формуле

$$M' = M (U/U_n)^2 = M \cdot 0,9^2 = M \cdot 0,81$$

Данные расчетов заносим в таблицу 1.2.

По рассчитанным данным строим механическую характеристику (рисунок 1.2).

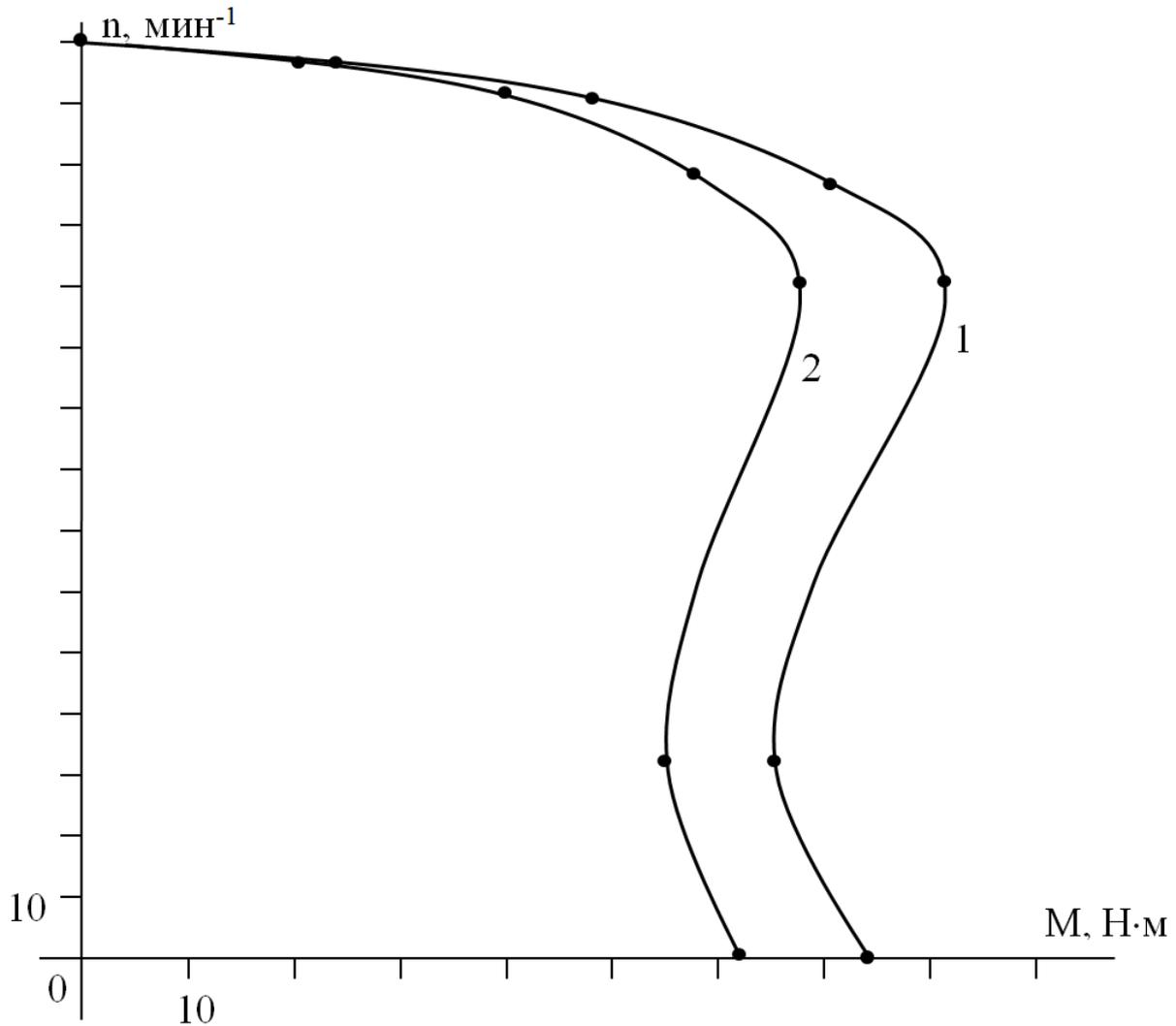


Рисунок 1.2 - Механические характеристики асинхронного электродвигателя: 1 – естественная, 2 – искусственная с уменьшенным напряжением питания

1.2 Контрольные задания

Задача 1.

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения рассчитать и построить:

- естественную механическую характеристику в двигательном режиме;
- искусственную характеристику в соответствии с вариантом;

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.3, где даны:

- номинальная мощность двигателя P_H , кВт;
- номинальный ток якоря $I_{ян}$, А;
- номинальная частота вращения n_n , мин⁻¹;
- номинальный коэффициент полезного действия η_n , %.

Таблица 1.3 - Исходные данные для расчета

№ варианта	P_n , кВт	$I_{ян}$, А	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	Искусственная характеристика
1	2	3	4	5	6
1	2,5	14,6	945	79	с $R_d = 0,4 R_H$
2	8,0	44	975	83	при $U = 0,7 U_H$
3	12,0	64	1450	84	с $R_d = 0,55 R_H$
4	18,0	94	1470	86	при $\Phi = 0,7 \Phi_H$
5	4,0	12	960	77	при $U = 0,7 U_H$
6	15	40	1430	85	с $R_d = 0,4 R_H$
7	17	45	1470	86	при $\Phi = 0,7 \Phi_H$
8	32	82	2940	88	при $U = 0,7 U_H$
9	16	86	1440	85	с $R_d = 0,4 R_H$
10	7,0	19,5	1420	83	при $U = 0,6 U_H$
11	4,5	26	725	77	при $\Phi = 0,7 \Phi_H$
12	6,0	33	740	82	при $R_d = 0,3 R_H$
13	12,0	65	740	84	при $R_d = 0,4 R_H$
14	55	31	2950	80	при $U = 0,7 U_H$
15	8,0	43,5	1450	83	при $\Phi = 0,7 \Phi_H$
16	24	124	2950	87	при $R_d = 0,4 R_H$
17	6,7	19,0	730	83	при $U = 0,7 U_H$
18	37	96	2920	88	с $R_d = 0,4 R_{ном}$
19	17,0	45	1450	86	при $\Phi = 0,7 \Phi_H$
20	17,0	45	1460	86	при $U = 0,7 U_H$
21	5,2	22,6	730	84	при $U = 0,7 U_H$
22	60	160	2980	86,5	с $R_d = 0,5 R_H$
23	10	50	1450	86	при $\Phi = 0,8 \Phi_H$
24	2,5	11	950	85	при $U = 0,7 U_H$
25	24	80	2940	88,5	с $R_d = 0,7 R_H$
26	15	78	1460	88	при $U = 0,5 U_H$
27	12	78	1470	87,5	при $\Phi = 0,8 \Phi_H$
28	26	63,8	2960	85,5	при $R_d = 0,5 R_{ном}$

№ варианта	P_n , кВт	$I_{ян}$, А	n_n , мин ⁻¹	η_n , %	Искусственная характеристика
1	2	3	4	5	6
29	16	134	1470	88	при $U = 0,8 U_n$
30	17,0	55	2970	90	при $\Phi = 0,7 \Phi_n$
31	16	80	2980	89	при $U = 0,7 U_n$
32	36	95	2960	85	при $R_d = 0,6 R_n$
33	5,0	21	730	84	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
34	2,5	14,6	1140	79	при $U = 0,7 U_n$
35	8	44	820	83	с $R_d = 0,5 R_n$
36	12	64	1310	83,5	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
37	18	94	1140	85	при $R_d = 0,5 R_n$
38	4	12	1100	76,5	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
39	15	40	700	84	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
40	17	45	1075	85	при $U = 0,7 U_n$
41	32	82	1130	86	при $R_d = 0,5 R_n$
42	16	86	635	84	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
43	32	82	1150	86,5	при $U = 0,6 U_n$
44	16	86	675	85	при $R_d = 0,2 R_n$
45	7,0	19,5	1520	83	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
46	7,0	19,5	1420	84	при $U = 0,8 U_n$
47	7	19,5	1530	84,5	при $R_d = 0,4 R_n$
48	4,5	26	1000	76	при $\Phi = 0,8 \Phi_n$
49	6,0	33	1075	77,5	при $R_d = 0,2 R_n$
50	12,0	65	758	84,5	при $U = 0,8 U_n$

Задача 2.

Построить естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Построить искусственную характеристику с уменьшенным на 20% напряжением питания. Данные двигателя приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

№ варианта	тип	P_n , Вт	s_n , %	η_n , %	$\cos \varphi$	M_{max}/M_n	M_n/M_n	M_{min}/M_n	I_n/I_n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота 1500 мин ⁻¹									
1	4AA50A4	0,06	8,1	50	0,6	2,2	2	1,2	5
2	4AA50B4	0,09	8,6	55	0,6	2,2	2	1,2	5
3	4AA56A4	0,12	8	63	0,66	2,2	2	1,2	5
4	4AA56B4	0,18	8,7	64	0,64	2,2	2	1,2	5
5	4A63A4	0,25	8	68	0,65	2,2	2	1,2	5

Продолжение таблицы 1.4

№ варианта	тип	P_n , Вт	s_n , %	η_n , %	$\cos \varphi$	M_{max}/M_n	M_n/M_n	M_{min}/M_n	I_n/I_n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	4A63B4	0,37	9	68	0,69	2,2	2	1,2	5
7	4A71A4	0,55	8,7	70,5	0,70	2,2	2	1,6	4,5
8	4A71B4	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5
9	4A80A4	1,1	6,7	75	0,81	2,2	2	1,6	5
10	4A80B4	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	1,6	5
11	4A90L4	2,2	5,4	80	0,83	2,2	2	1,6	6
12	4A100S4	3	5,3	82	0,83	2,2	2	1,6	6,5
13	4A100L4	4	5,3	84	0,84	2,2	2	1,6	6
14	4A112M4	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	1,6	7
15	4A132S4	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
16	4A132M4	11	2,8	87,5	0,87	2,2	2	1,6	7,5
17	4A160S4	15	2,7	89	0,88	2,2	1,4	1	7
18	4A160M4	18,5	2,7	90	0,88	2,2	1,4	1	7
19	4A180S4	22	2	90	0,9	2,2	1,4	1	7
20	4A180M4	30	2	91	0,89	2,2	1,4	1	7
21	4A200M4	37	1,7	91	0,9	2,2	1,4	1	7
22	4A200L4	45	1,8	92	0,9	2,2	1,4	1	7
23	4A225M4	55	2	92,5	0,9	2,2	1,2	1	7
24	4A250S4	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2	1	7
25	4A250M4	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2	1	7
26	4A280S4	110	2,3	92,5	0,9	2	1,2	1	7
27	4A280M4	132	2,3	93	0,9	2	1,2	1	7
28	4A315S4	160	2	93,5	0,91	1,9	1	0,9	6,5
29	4A315M4	200	1,7	94	0,92	1,9	1	0,9	7
30	4A355S4	250	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
31	4A355M4	315	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7

2 Реостатный пуск электродвигателей

2.1 Примеры решения задач

Задача 1.

Определить аналитически величины и число секций пускового реостата при форсированном пуске двигателя постоянного тока с независимым возбуждением типа 4ПНМ180Б, имеющего следующие паспортные данные:

$$P_{\text{н}} = 10 \text{ кВт}; U_{\text{н}} = 220 \text{ В}; I_{\text{н}} = 53 \text{ А}; n_{\text{н}} = 1100 \text{ мин}^{-1}; \eta_{\text{н}} = 83,6\%.$$

Построить пусковую характеристику в относительных величинах.

Решение:

Сопротивление якоря $R_{\text{я}}$, Ом:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 (1 - \eta_{\text{н}}) \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{я}} = 0,5 \cdot (1 - 0,836) \frac{220}{53} = 0,34 \text{ Ом}.$$

Номинальное сопротивление двигателя $R_{\text{н}}$, Ом:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{н}} = \frac{220}{53} = 4,15 \text{ Ом}.$$

Относительное сопротивления якоря

$$R_{\text{я}}^0 = \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{я}}^0 = \frac{0,34}{4,15} = 0,082.$$

Т.к. пуск двигателя форсированный, относительные значения пусковых моментов выбираем из соотношений:

Максимальный пусковой момент

$$M_{\text{л}}^0 = 2,0 - 2,5,$$

Момент переключения

$$M_2^0 = 1,1 - 1,2.$$

Принимаем

$$M_1^0 = 2,25; M_2^0 = 1,15.$$

Тогда кратность пусковых моментов (токов) при пуске:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2},$$

$$\lambda = \frac{2,25}{1,15} = 1,96.$$

Количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{1}{M_2^0 R_{\text{я}}^0}}{\lg \lambda},$$

$$m = \frac{\lg \frac{1}{1,15 \cdot 0,082}}{\lg 1,96} = 3,51.$$

Принимаем число ступеней $m = 4$. Рассчитываем уточнённое значение λ и M_1^0

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{M_2^0 R_{\text{я}}^0}},$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{1}{1,15 \cdot 0,082}} = 1,8,$$

$$M_1^0 = \lambda \cdot M_2^0 = 1,8 \cdot 1,15 = 2,07.$$

Величины сопротивлений ступеней пускового реостата

$$R_i = R_{\text{я}} \cdot \lambda^{i-1} (\lambda - 1),$$

$$R_i = R_{i-1} \lambda,$$

$$R_1 = 0,34 \cdot (1,8 - 1) = 0,27 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 0,27 \cdot 1,8 = 0,49 \text{ Ом},$$

$$R_3 = 0,49 \cdot 1,8 = 0,88 \text{ Ом},$$

$$R_4 = 0,88 \cdot 1,8 = 1,59 \text{ Ом},$$

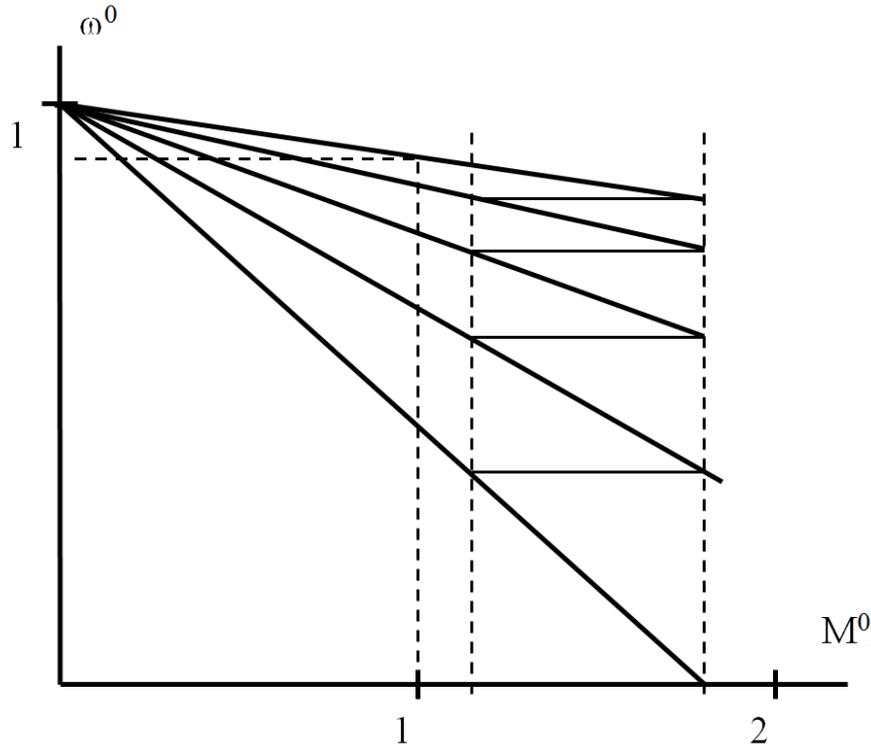


Рисунок 2.1 - Пусковая характеристика ДПТ независимого возбуждения

Задача 2.

Определить число и величины сопротивлений секций пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные:

$$P_H = 22 \text{ кВт}; n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}; s_H = 2,5\%; \mu_K = 2,5;$$

$$\text{Данные ротора: } E_{2H} = 340 \text{ В}, I_{2H} = 45 \text{ А}.$$

Решение:

Сопротивление ротора R_2 , Ом:

$$R_2 = \frac{E_{2H} s_H}{I_{2H} \sqrt{3}},$$

$$R_2 = \frac{340 \cdot 0,025}{45 \cdot \sqrt{3}} = 0,11 \text{ Ом.}$$

Выберем значения пусковых моментов из соотношений:
Максимальный пусковой момент

$$M_1^0 = (0,7 - 0,85) \mu_{\kappa},$$

Момент переключения

$$M_2^0 = 1,1 - 1,2.$$

Принимаем

$$M_1^0 = 0,775 \cdot 2,5 = 1,94; M_2^0 = 1,15.$$

Тогда кратность пусковых моментов при пуске:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2},$$

$$\lambda = \frac{1,94}{1,15} = 1,68.$$

Количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{\lg \frac{1}{M_1^0 s_H}}{\lg \lambda},$$

$$m = \frac{\lg \frac{1}{1,94 \cdot 0,025}}{\lg 1,63} = 5,83.$$

Принимаем число ступеней $m = 6$. Рассчитываем уточнённое значение λ и M_2^0

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{M_2^0 s_H}},$$

$$\lambda = \sqrt[7]{\frac{1}{1,15 \cdot 0,025}} = 1,66,$$

$$M_2^0 = M_2^0 / \lambda = 1,94 / 1,66 = 1,17$$

Величины сопротивлений секций пускового реостата

$$R_i = R_2 \cdot \lambda^{i-1} (\lambda - 1),$$

$$R_i = R_{i-1} \lambda,$$

$$R_1 = 0,11 \cdot (1,66 - 1) = 0,073 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 0,073 \cdot 1,66 = 0,121 \text{ Ом},$$

$$R_3 = 0,121 \cdot 1,66 = 0,200 \text{ Ом},$$

$$R_4 = 0,2 \cdot 1,66 = 0,332 \text{ Ом},$$

$$R_5 = 0,332 \cdot 1,66 = 0,551 \text{ Ом},$$

$$R_6 = 0,551 \cdot 1,66 = 0,915 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление пускового реостата R_n , Ом,

$$R_n = \Sigma R_i = 0,073 + 0,121 + 0,200 + 0,332 + 0,551 + 0,915 = 2,192 \text{ Ом}.$$

2.2 Контрольные задания

Задача 1.

Для двигателя постоянного тока аналитически рассчитать сопротивление секций пускового реостата для условий форсированного пуска ($M_1^0 = 2 - 2,5$). Построить пусковую характеристику в относительных единицах. Данные двигателя согласно варианта приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Вариант	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Ток якоря, А	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹
1	2	3	4	5	6
1	4ПО80А2	0,25	110	3,5	1000
2			220	1,8	
3		0,37	110	5,0	1500
4			220	2,5	
5		0,55	110	7,0	2200

Продолжение таблицы 2.1

Вариант	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Ток якоря, А	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	
1	2	3	4	5	6	
6	4ПО80А2	0,55	220	3,5	3000	
7		0,75	110	9,4		
8			220	4,7		
9	4ПО80В1	0,37	110	4,8	1000	
10			220	2,4		
11		0,55	110	7,4	1500	
12			220	3,7		
13		0,75	110	9,4	2200	
14			220	4,7		
15		1,1	110	13,0	3000	
16			220	6,5		
17		4ПБ80А2	0,18	110	2,8	1000
18				220	1,4	
19	0,25		110	3,4	1500	
20	4ПБ80В1	0,37	220	1,7	2200	
21			110	4,6		
22		0,55	220	2,3	3000	
23			110	7,0		
24		0,25	220	3,5	1000	
25			110	3,4		
26	4ПБ80В1	0,37	220	1,7	1500	
27			110	4,8		
28		0,55	220	2,4	2200	
29			110	6,8		
30		0,80	220	3,4	3000	
31			110	9,2		
32	0,37	220	4,6	750		
33		110	5,0			
34	4ПО100S1	0,55	220	2,3	1000	
35			110	7,3		
36		0,75	220	3,5	1500	
37			110	9,2		
38		1,1	220	4,5	2200	
39			110	12,8		
40		1,6	220	6,4	3000	
41			110	19,0		
42			220	9,5		

Задача 2.

Для асинхронного электродвигателя с фазным ротором аналитически рассчитать необходимое число секций и сопротивления секций пускового реостата. Данные двигателя приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором

№	Тип электродвигателя	P_n , кВт	Энергетические показатели		I_{2H} А	E_{2H} В	Механическая характеристика	
			КПД, %	$\cos\varphi_n$			M_k	s_n , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	АИРФ100S4	2,2	75	0,70	22,5	84	2,2	5,2
2	АИРФ100L4	3,0	77	0,78	21,2	91	2,5	5,8
3	АИРФ112М4	4,0	80	0,80	24	126	2,5	4,6
4	АИРФ132S4	5,5	82	0,82	28	138	2,5	3,6
5	АИРФ132М4	7,5	85	0,78	64	185	2,5	3,5
6	АИРФ160Б4	11	86	0,86	22	305	2,5	4,4
7	АИРФ160М4	15	88	0,87	29	300	2,5	3,7
8	АИРФ180М4	18,5	89	0,88	38	295	2,5	2,9
9	АИРФ200М4	22	89,5	0,87	45	340	2,5	2,5
10	АИРФ200Б4	30	90	0,87	55	350	2,5	2,5
11	АИРФ225М4	37	90,5	0,87	160	160	2,5	3,5
12	АИРФ250Б4	45	91	0,88	170	230	2,5	3,0
13	АИРФ250М4	55	91,5	0,90	170	200	2,5	2,3
14	АИРФ250М4	75	92	0,86	170	250	2,5	2,5
15	АИРФ28084	90	92,5	0,84	210	250	2,2	4,2
16	АИРФ280М4	110	92,5	0,81	223	260	2,2	3,8
17	АИРФ31584	132	93	0,82	242	280	2,2	3,8
18	АИРФ315М4	160	93	0,87	257	310	2,2	3,6
19	АИРФ35554	200	93,5	0,87	330	300	2,2	3,5
20	АИРФ355М4	250	93,5	0,87	400	370	2,2	3,5
21	АИРФ100L6	1,5	65	0,80	12,8	118	2,5	5,8
22	АИРФ112М6	2,2	70	0,87	14,2	135	2,5	5,2
23	АИРФ112М6	3,0	72	0,87	12,2	186	2,5	4,8
24	АИРФ13286	4,0	78	0,88	16,1	262	2,5	4,6
25	АИРФ132М6	5,5	81	0,88	17,4	282	2,5	4,4
26	АИРФ16086	7,5	85	0,77	18	300	2,5	5,1
27	АИРФ160М6	11	86	0,76	20	310	2,5	4,3
28	АИРФ180М6	15	87,5	0,80	25	325	2,2	4,4
29	АИРФ200М6	18,5	88	0,81	35	360	2,5	3,5
30	АИРФ200Б6	22	88,5	0,80	45	330	2,5	3,5
31	АИРФ225М6	30	89	0,85	150	140	2,5	3,5
32	АИРФ25086	37	89,5	0,84	165	150	2,5	3,5
33	АИРФ25056	45	90	0,87	160	180	2,5	2,5
34	АИРФ250М6	55	90,5	0,87	182	191	2,5	3,5
35	АИРФ280Я6	75	91	0,86	200	210	2,2	3,6
36	АИРФ280М6	90	91,5	0,88	270	230	2,2	3,6
37	АИРФ31586	110	92	0,87	292	291	2,2	3,6
38	АИРФ315М6	132	92,5	0,88	300	268	2,2	3,6
39	АИРФ35586	160	93	0,82	346	290	2,2	3,6
40	АИРФ355М6	200	93,5	0,88	400	302	2,2	2,8

3 Механика и динамика электропривода

3.1 Примеры решения задач

Задача 1.

Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 3.1.

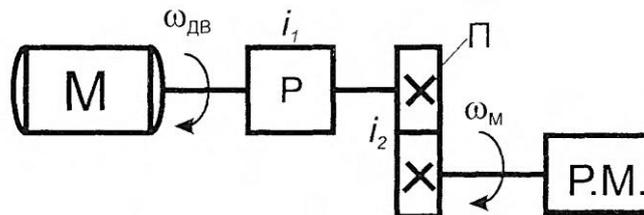


Рисунок 3.1 - Кинематическая схема системы «электродвигатель – рабочая машина». М – электродвигатель; Р – редуктор; П - клиноремённая передача; Р.М. - рабочая машины; i_1 - передаточное отношение редуктора; i_2 - передаточное отношение клиноремённой передачи; $\omega_{дв}$ - угловая скорость вращения вала электродвигателя; $\omega_м$ – угловая скорость вращения вала рабочей машины.

Момент сопротивления на валу рабочей машины: $M_м = 1200 \text{ Н}\cdot\text{м}$; Передаточное отношение редуктора $i_1 = 28$; передаточное отношение клиноремённой передачи, $i_2 = 2$; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,86$; к.п.д. клиноремённой передачи $\eta_{пер} = 0,8$.

Решение:

Скорость вращения $\omega_{дв}$, с^{-1} , электродвигателя

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_1}{30},$$
$$\omega_{дв} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

Общее передаточное отношение

$$i = i_1 \cdot i_2 = 28 \cdot 2 = 56.$$

Общий к.п.д. системы

$$\eta_{п} = \eta_p \cdot \eta_{пер} = 0,86 \cdot 0,8 = 0,69.$$

Момент сопротивления рабочей машины $M_{сн}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{сн} = \frac{M_m}{i \cdot \eta_n} = \frac{1200}{56 \cdot 0,69} = 31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчётная мощность $P_{рас}$, Вт, электродвигателя

$$P_{рас} = M_{сн} \cdot \omega_{дв} = 31 \cdot 157 = 4867 \text{ Вт}.$$

Задача 2.

Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 3.2.

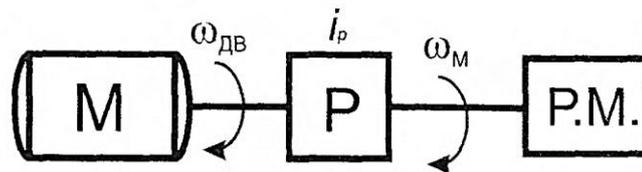


Рисунок 3.2 - Кинематическая схема системы «электродвигатель – рабочая машина»

Рабочая машина совершает поступательное движение и проходит расстояние $S = 6$ метров за 40 секунд; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,66$; Усилие необходимое для передвижения механизма $F = 36000 \text{ Н}$.

Решение:

Скорость вращения $\omega_{дв}$, с^{-1} , электродвигателя

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_1}{30},$$

$$\omega_{дв} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с}.$$

Скорость поступательного движения v , м/с, рабочей машины

$$v = \frac{S}{t},$$

$$v = \frac{6}{40} = 0.15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{сн}}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{F \cdot v}{\omega_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{п}}} = \frac{36000 \cdot 0,15}{105 \cdot 0,66} = 78 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчётная мощность $P_{\text{рас}}$, Вт, электродвигателя

$$P_{\text{рас}} = M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{дв}} = 78 \cdot 105 = 8190 \text{ Вт.}$$

Задача 3.

Определить расчётную мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором и момент инерции системы «электродвигатель - механизм подъёмной лебёдки», кинематическая схема которой представлена на рисунке 3.3.

Дано:

Скорость вращения приводного электродвигателя $\omega_{\text{дв}} = 157 \text{ с}^{-1}$; момент инерции электродвигателя $J_{\text{дв}} = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; к.п.д. передачи $\eta_{\text{п}} = 0,92$; масса барабана $m_{\text{б}} = 1400 \text{ кг}$; радиус барабана $R = 1,25 \text{ м}$; масса груза $m_{\text{гр}} = 200 \text{ кг}$; скорость поступательного движения груза $v = 0,22 \text{ м/с}$; коэффициент трения $f_{\text{мп}} = 0,66$.

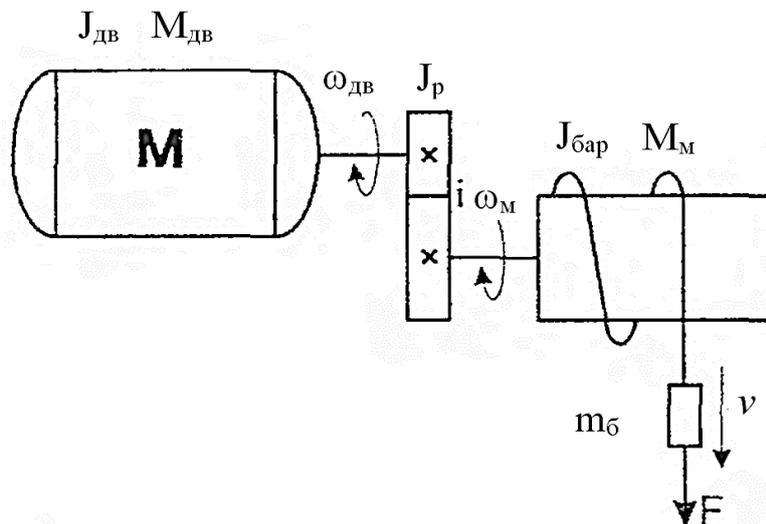


Рисунок 3.3 - Кинематическая схема системы «электродвигатель-подъёмная лебедка»

Решение:

Момент инерции барабана относительно своей оси $J_{\text{бap}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, как для сплошного цилиндра:

$$J_{\text{бар}} = m_{\text{б}} \cdot p^2 = m_{\text{б}} \cdot \frac{R^2}{2},$$

где $m_{\text{б}}$ - масса барабана, кг;

p - радиус инерции сплошного цилиндра, м;

R - радиус барабана, м;

$$J_{\text{бар}} = 1400 \cdot \frac{1,25^2}{2} = 1093 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Скорость вращения $\omega_{\text{дв}}$, с^{-1} , вала машины

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot p \cdot v}{R},$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,22}{1,25} = 1,1 \text{ с}^{-1}.$$

Момент инерции машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_{\text{м}} = J_{\text{с}} \frac{\omega_{\text{м}}^2}{\omega_{\text{дв}}^2} + m \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2},$$

$$J_{\text{м}} = 1093 \frac{1,1^2}{157^2} + 200 \frac{0,22^2}{157^2} = 0,0544 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции $J_{\text{р}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ редуктора

$$J_{\text{р}} = 1,1 \cdot J_{\text{дв}},$$

$$J_{\text{р}} = 1,1 \cdot 0,08 = 0,088 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции $J_{\text{сис}}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ системы

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}},$$

$$J_{\text{сис}} = 0,08 + 0,088 + 0,0544 = 0,222 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Передаточное отношение редуктора

$$i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{м}}} = \frac{157}{1,1} = 142.$$

Усилие F , Н, необходимое для поднятия груза

$$F = 9.81 \cdot m_{\text{гр}} \cdot f_{\text{тр}},$$

$$F = 9.81 \cdot 200 \cdot 0,66 = 1295 \text{ Н},$$

где $m_{\text{гр}}$ - масса груза, кг;

$f_{\text{тр}}$ - коэффициент трения ($f_{\text{тр}} = 0,66$).

Вращающий момент механизма $M_{\text{м}}$, Н · м, подъёма груза на своём валу

$$M_{\text{м}} = F \cdot R,$$

$$M_{\text{м}} = 1295 \cdot 1.25 = 1619 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вращающий момент $M_{\text{сн}}$, Н · м, механизма подъёма груза, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{м}}}{i \cdot \eta_{\text{п}}},$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{1619}{142 \cdot 0.92} = 12.4 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $M_{\text{м}}$ - вращающий момент барабана относительно оси, проходящей через центр тяжести и проходящей параллельно длине барабана, Н · м;

i - передаточное отношение редуктора;

$\eta_{\text{п}}$ - к.п.д. редуктора.

Расчётная мощность $P_{\text{рас}}$, Вт, приводного электродвигателя механизма подъёма груза

$$P_{\text{рас}} = M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{дв}} \text{ Вт},$$

$$P_{\text{рас}} = 12.4 \cdot 157 = 1947 \text{ Вт}.$$

Задача 4.

Грузоподъёмная лебёдка, кинематическая схема которой представлена на рисунке 3.3 имеет грузоподъёмность: вес поднимаемого груза и крюка $G = 22600 \text{ Н}$.

Диаметр барабана $D_{\text{б}} = 0,4 \text{ м}$; к.п.д. барабана $\eta_{\text{б}} = 0,97$; к.п.д. редуктора $\eta_{\text{н}} = 0,96$; скорость вращения электродвигателя $\omega_{\text{дв}} = 104,5 \text{ с}^{-1}$; передаточное отношение редуктора $i = 25$; момент инерции электродвигателя $J_{\text{дв}} = 0,84 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент инерции барабана на своём валу $J_{\text{б}} = 77,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

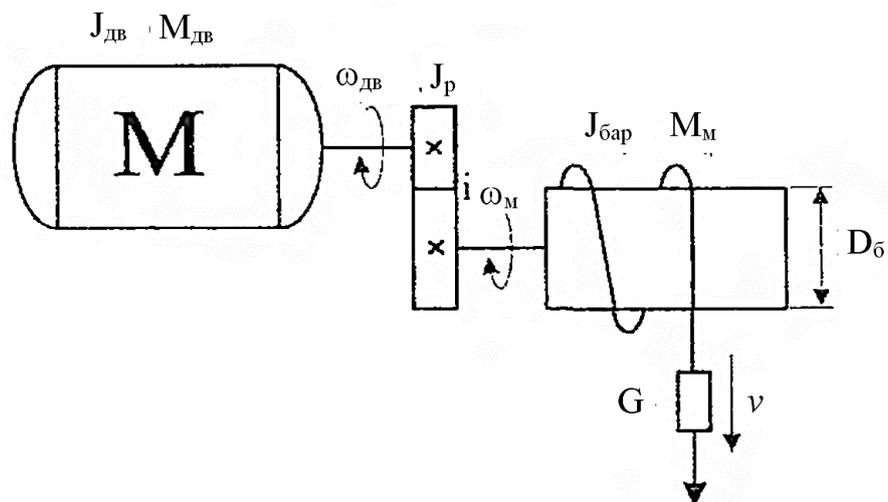


Рисунок 3.3 - Кинематическая схема грузоподъемной лебедки

Определить:

- скорость подъёма груза;
- моменты на валах барабана и электродвигателя при подъёме и опускании груза;
- мощность на валу электродвигателя при подъёме груза;
- момент инерции системы «электродвигатель - механизм подъёма груза».

Решение:

Скорость вращения $\omega_m, \text{с}^{-1}$, барабана

$$\omega_m = \frac{\omega_{дв}}{i},$$

$$\omega_m = \frac{104,5}{25} = 4,18 \text{ с}^{-1}.$$

Скорость поступательного движения $v, \text{м/с}$, перемещения груза

$$v = \frac{\omega_m \cdot R}{2 \cdot p},$$

$$v = \frac{4,18 \cdot 0,4/2}{2 \cdot 3,14} = 0,133 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Вращающий момент на валу барабана $M_m, \text{Н} \cdot \text{м}$, при подъёме груза

$$M_m = \frac{G \cdot v}{\omega_m \cdot z_б},$$

$$M_M = \frac{22600 \cdot 0,133}{4,18 \cdot 0,97} = 741,33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вращающий момент механизма подъёма груза $M_{\text{сн}}$, Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_{\text{п}}},$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{741,33}{25 \cdot 0,96} = 19,94 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вращающий тормозной момент на валу барабана $M_{\text{тм}}$, Н · м, при спуске груза

$$M_{\text{тм}} = M_M \cdot \eta_{\text{п}}^2,$$

$$M_{\text{тм}} = 741,33 \cdot 0,96^2 = 711,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вращающий тормозной момент механизма опускания груза $M_{\text{т}}$, Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{т}} = \frac{M_{\text{тм}}}{i} \eta_{\text{п}}^2,$$

$$M_{\text{т}} = \frac{711,7}{25} 0,96^2 = 26,23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность на валу электродвигателя $P_{\text{рас}}$, Вт, при подъёме груза

$$P_{\text{рас}} = M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{дв}},$$

$$P_{\text{рас}} = 19,94 \cdot 104,5 = 2083,7 \text{ Вт}.$$

Момент инерции системы $J_{\text{сис}}$, кг · м², «электродвигатель - механизм подъёма груза

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + \frac{J_{\text{б}}}{i^2},$$

$$J_{\text{сис}} = 0,84 + 1,1 + \frac{77,5}{25^2} = 1,888 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Задача 5.

Определить время торможения системы «электродвигатель - рабочая машина», если электродвигатель останавливается за счёт сил сопротивления в рабочей машине от $\omega_{раб} = 153 \text{ с}^{-1}$ до нуля. Электродвигатель: АИРФ132М4; $J_{дв} = 0,027 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; рабочая машина - железный сплошной цилиндр, ось вращения которого проходит через центр тяжести. Радиус цилиндра $R = 0,4 \text{ м}$; длина цилиндра $l = 0,6 \text{ м}$; плотность железа $\rho = 7,88 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент полезного действия и передаточное отношение редуктора $\eta_p = 0,9$; $i = 35$. Момент сопротивления рабочей машины относительно своей оси $M_M = 1323 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Решение:

Масса цилиндра $m_{ц}$ вычисляется по формуле

$$m_{ц} = \pi \cdot R^2 \cdot l \cdot \rho,$$

$$m_{ц} = 3,14 \cdot 0,4^2 \cdot 0,6 \cdot 7,88 \cdot 10^3 = 2375 \text{ кг}.$$

Момент инерции цилиндра J_c , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, относительно своей оси

$$J_c = m_{ц} \cdot p^2 = m_{ц} \frac{R^2}{2},$$

$$J_c = 2375 \frac{0,4^2}{2} = 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_M = \frac{J_c}{i^2},$$

$$J_M = \frac{190}{35^2} = 0,155 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции системы $J_{сис}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ вычисляем по формуле

$$J_{сис} = J_{дв} + J_p + J_M,$$

$$J_{сис} = 0,027 + 1,1 \cdot 0,027 + 0,155 = 0,2117 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент сопротивления рабочей машины $M_{сн}$, $\text{Н} \cdot \text{м}$, приведённый к валу электродвигателя

$$M_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{м}}}{i \cdot \eta_{\text{б}}},$$

$$M_{\text{сн}} = \frac{1323}{35 \cdot 0,9} = 42 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Время торможения $t_{\text{торм}}$ с, системы «электродвигатель-рабочая машина»

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{сис}} \frac{\Delta \omega_{\text{раб}}}{M_{\text{с}}}$$

$$t_{\text{торм}} = 0,2117 \frac{153}{42} = 0,771 \text{ с}$$

Задача 6.

Рассчитать методом площадей продолжительность пуска электропривода, состоящего из асинхронного электродвигателя с вентилятором. Считать приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода в 10 раз больше момента инерции двигателя. Механическая характеристика механизма описывается вентиляторной характеристикой с начальным моментом, составляющим 20% от номинального момента двигателя, номинальная скорость равна номинальной скорости двигателя, номинальный момент равен номинальному моменту двигателя.

Характеристики электродвигателя:

Тип – 4А112М4У3

Номинальная мощность $P_{\text{н}} = 5,5 \text{ кВт}$,

Номинальное скольжение $s_{\text{н}} = 5 \%$,

Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,86$,

Номинальный КПД $\eta_{\text{н}} = 85,5 \%$,

Кратность пускового момента $\mu_{\text{п}} = 2$,

Кратность критического момента $\mu_{\text{к}} = 2,2$,

Кратность минимального момента $\mu_{\text{мин}} = 1,6$,

Кратность пускового тока $K_{\text{i}} = 7$.

Решение:

Для расчета продолжительности пуска используем графоаналитический метод площадей.

Произведем расчет механической характеристики двигателя. Вычислим значения момента и частоты вращения в характерных точках характеристики:

Синхронная точка.

Скорость двигателя равна синхронной

$$n_1 = \frac{60 f}{p},$$

где f – частота токов статора,
 p – число пар полюсов статора.

$$n_l = (60 \cdot 50) / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Момент двигателя равен 0.

Номинальная точка.

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_l (1 - s_n),$$

где s_n – номинальное скольжение.

$$n_n = 1500 \cdot (1 - 0,05) = 1425 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальный момент рассчитывается по формуле

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n},$$

где P_n – номинальная мощность двигателя,
 n_n – номинальная частота вращения ротора.

$$M_n = 9,55 \cdot (5500 / 1425) = 36,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическая точка.

критическое скольжение

$$s_k = s_n \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right),$$

$$s_k = 0,05 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,21.$$

Критическая частота вращения

$$n_k = n_l (1 - s_k),$$

$$n_k = 1500 \cdot (1 - 0,21) = 1185 \text{ мин}^{-1}.$$

Критический момент

$$M_k = \mu_k M_n,$$

где μ_k – кратность критического момента (из паспортных данных двигателя).

$$M_k = 2,2 \cdot 36,9 = 81,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Точка минимального момента.

Минимальный момент определяется по формуле

$$M_{min} = \mu_{min} M_n,$$

где μ_{min} - кратность минимального момента (из паспортных данных).

$$M_{min} = 1,6 \cdot 36,9 = 59 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Частота вращения в минимального точке приблизительно равна 20% от синхронной.

$$n_{min} = 0,2 \cdot 1500 = 500 \text{ мин}^{-1}.$$

Пусковая точка.

Частота вращения в пусковой точке равно 0. Момент рассчитывается по формуле

$$M_n = \mu_n M_n,$$

где μ_n - кратность пускового момента (из паспортных данных).

$$M_n = 2,0 \cdot 36,9 = 73,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Дополнительно к этим точкам рассчитаем еще три, используя упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}.$$

Скольжение в первой точке возьмем приблизительно равным половине от номинального, во второй и третьей точках приблизительно равномерно между номинальным и критическим. Принимаем

$$s_1 = 0,025; s_2 = 0,1; s_3 = 0,15;$$

Соответствующие им частоты вращения

$$n_1 = 1500 \cdot (1 - 0,025) = 1463 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_2 = 1500 \cdot (1 - 0,1) = 1350 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_3 = 1500 \cdot (1 - 0,15) = 1275 \text{ мин}^{-1}.$$

Моменты в точках

$$M_1 = (2 \cdot 81,2) / (0,025/0,21 + 0,21/0,025) = 18,9 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$M_2 = (2 \cdot 81,2) / (0,1/0,21 + 0,21/0,1) = 62,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$M_3 = (2 \cdot 81,2) / (0,15/0,21 + 0,21/0,15) = 77,3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Данные расчетов сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
$n, \text{ мин}^{-1}$	1500	1463	1425	1350	1275	1185	500	0
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	0	18,9	36,9	62,5	77,3	81,2	59	73,8

Рассчитаем механическую характеристику производственного механизма, которая является вентиляторной и может быть рассчитана по формуле Бланка

$$M = M_{c.0.} + M_{c.n.} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2,$$

где $M_{c.0.}$ – начальный момент сопротивления,

$M_{c.n.}, n_n$ – номинальные момент сопротивления и частота вращения.

Согласно заданию

$$M_{c.0.} = 0,2 M_n = 0,2 \cdot 36,9 = 7,4 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{c.n.} = 0,8 M_n = 0,8 \cdot 36,9 = 29,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где M_n – номинальный момент двигателя.

Номинальные частоты механизма и двигателя совпадают.

Результаты расчета характеристики механизма сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Механическая характеристика производственного механизма

$n, \text{ мин}^{-1}$	0	300	600	900	1200	1500
$M_c, \text{ Н}\cdot\text{м}$	7,4	8,6	12,1	18	26,3	37,1

Для нахождения времени пуска электропривода на одном чертеже строим механическую характеристику двигателя $M_d(n)$ и механическую характеристику производственного механизма $M_c(n)$ (рисунок 3.4).

Находим зависимость динамического момента от частоты $M_{дин}(n) = M_{д}(n) - M_c(n)$ как графическую разность характеристик.

Аппроксимируем полученную характеристику ступенчатой кривой. Для достижения необходимой точности число ступеней должно быть не менее 5.

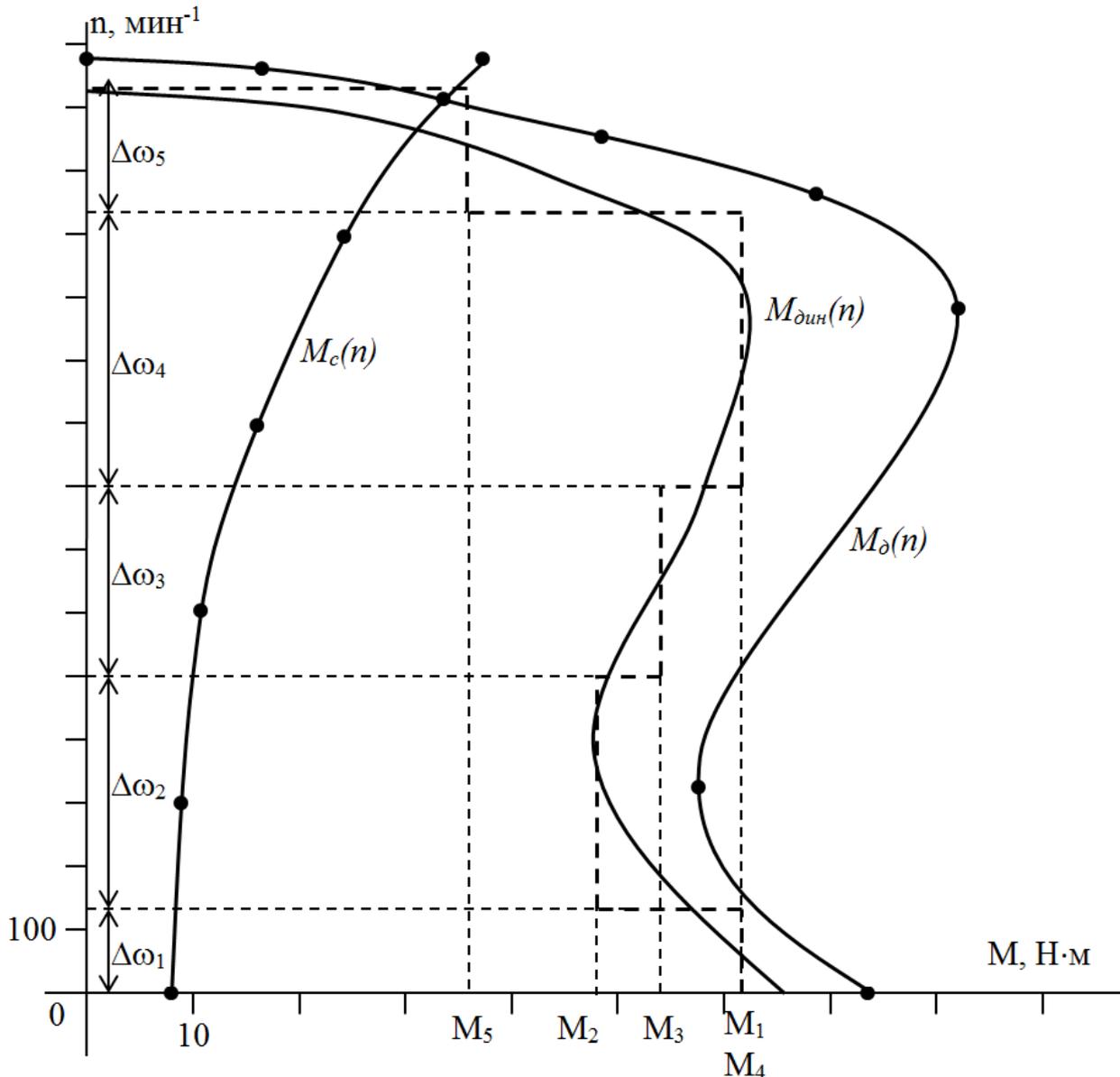


Рисунок 3.4 - Нахождение времени пуска электропривода

Согласно уравнению движения электропривода, заменив бесконечно малые приращения конечными, находим время разгона на каждом вертикальном участке по формуле

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta \omega_i}{M_{дин.i}} = J \frac{\Delta n_i}{9,55 M_{дин.i}}$$

где J – суммарный приведенный момент инерции электропривода.

Согласно заданию

$$J=10 \cdot J_0 = 10 \cdot 1,66 \cdot 10^{-2} = 16,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

J_0 – момент инерции двигателя.

$\Delta\omega_i$ – изменение скорости на i -том участке,

$M_{динi}$ – динамический момент на i -том участке.

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 130 / (9,55 \cdot 62) = 0,036 \text{ с},$$

$$\Delta t_2 = 0,166 \cdot 366 / (9,55 \cdot 48) = 0,132 \text{ с},$$

$$\Delta t_3 = 0,166 \cdot 300 / (9,55 \cdot 54) = 0,096 \text{ с},$$

$$\Delta t_4 = 0,166 \cdot 430 / (9,55 \cdot 62) = 0,120 \text{ с},$$

$$\Delta t_5 = 0,166 \cdot 200 / (9,55 \cdot 36) = 0,096 \text{ с}.$$

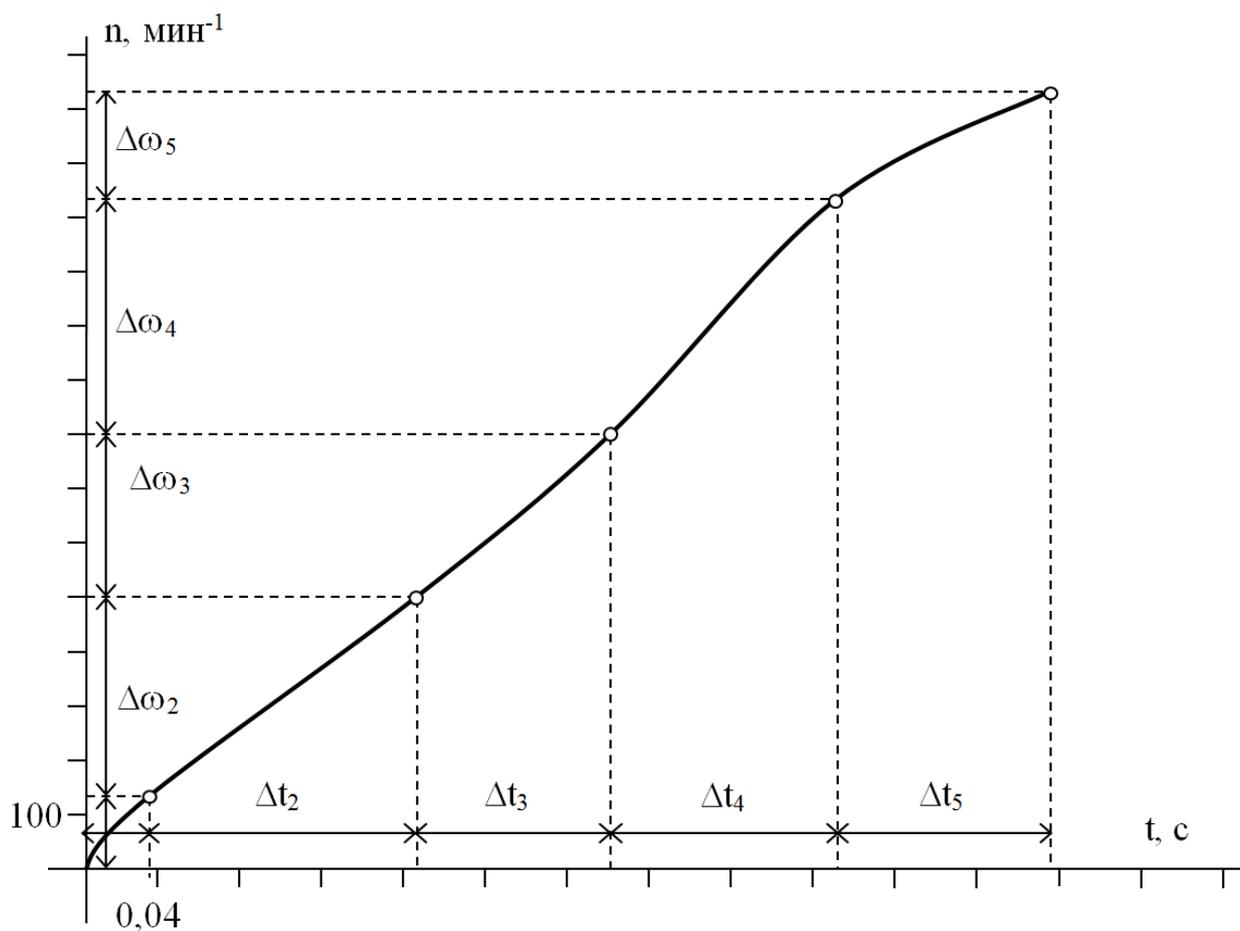


Рисунок 3.5 - Разгонная кривая электропривода

Общее время разгона электропривода

$$t_{\text{раз}} = \sum \Delta t_i,$$

$$t_{\text{раз}} = 0,036 + 0,132 + 0,096 + 0,120 + 0,096 = 0,48 \text{ с.}$$

Строим разгонную кривую, показывающую изменение скорости вращения двигателя во время пуска (рисунок 3.5).

3.2 Контрольные задания

Задача 1.

Рассчитать продолжительность пуска электропривода, состоящего из асинхронного двигателя с вентилятором методом площадей. Считать приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода в 10 раз больше момента инерции двигателя. Механическая характеристика механизма описывается вентиляторной характеристикой с начальным моментом, составляющим 10% от номинального момента двигателя, номинальная скорость равна номинальной скорости двигателя, номинальный момент равен номинальному моменту двигателя.

Параметры двигателя приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Параметры электродвигателей

вариант	Тип	P_n , кВт	n_n , мин ⁻¹	КПД, %	$\cos\varphi$	I_n/I_n	M_n/M_n	M_{max}/M_n	M_{min}/M_n	Момент инерции J , кг·м ²
1	АИР 71А2	0,75	2820	79	0,80	6	2,6	2,7	1,6	0,0006
2	АИР 71В2	1,1	2800	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	1,6	0,0008
3	АИР 71А4	0,55	1360	71	0,71	5	2,3	2,4	1,8	0,0010
4	АИР 71В4	0,75	1350	72	0,75	5,0	2,5	2,6	2,4	0,0015
5	АИР 71А6	0,37	900	65	0,63	4,5	2,1	2,2	1,6	0,0015
6	АИР 71В6	0,55	920	69	0,68	4,5	1,9	2,2	1,6	0,0020
7	АИР 80А2	1,5	2880	82	0,85	6,5	2,2	2,6	1,8	0,0011
8	АИР 80В2	2,2	2860	83	0,87	6,4	2,1	2,6	1,8	0,0018
9	АИР 80А4	1,1	1420	76,5	0,77	5	2,2	2,4	1,7	0,0028
10	АИР 80В4	1,5	1410	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	1,7	0,0034
11	АИР 80А6	0,75	920	71	0,71	4	2,1	2,2	1,6	0,0035
12	АИР 80В6	1,1	920	75	0,71	4,5	2,2	2,3	1,8	0,0048
13	АИР 90L2	3	2860	83,5	0,88	7	2,3	2,6	1,7	0,0024
14	АИР 90L4	2,2	1430	80	0,79	6	2,0	2,4	2,0	0,0056
15	АИР 90L6	1,5	940	76,5	0,71	5	2,0	2,3	1,9	0,0066
16	АИР 100S2	4	2850	87	0,88	7,5	2,0	2,4	1,6	0,0070

вариант	Тип	P_n , кВт	n_n , мин ⁻¹	КПД, %	$\cos\varphi$	I_n/I_n	M_n/M_n	M_{max}/M_n	M_{min}/M_n	Момент инерции J , кг·м ²
17	АИР 100L2	5,5	2850	88	0,88	7,5	2,1	2,4	1,6	0,0080
18	АИР 100S4	3	1410	82	0,82	7	2,0	2,2	1,6	0,0100
19	АИР 100L4	4	1410	85	0,84	7	2,1	2,4	1,6	0,0130
20	АИР 100L6	2,2	940	81,5	0,74	6	1,9	2,2	1,6	0,0200
21	АИР 112M2	7,5	2900	87,5	0,88	7,5	2,0	2,2	1,6	0,0185
22	АИР 112M4	5,5	1430	85,5	0,86	7	2,0	2,5	1,6	0,0236
23	АИР 112МА6	3	950	81,5	0,76	6	2,0	2,2	1,6	0,0380
24	АИР 112МВ6	4	950	82	0,81	6	2,0	2,2	1,6	0,0425
25	АИР 132M2	11	2910	87,5	0,88	7,5	1,6	2,2	1,2	0,0227
26	АИР 132S4	7,5	1440	86	0,83	7,5	2,0	2,5	1,6	0,0227
27	АИР 132M4	11	1450	87,5	0,79	7,5	2,4	2,9	2,2	0,0349
28	АИР 132S6	5,5	960	85	0,80	7	2,0	2,2	1,6	0,0500
29	АИР 132M6	7,5	950	85	0,79	7	2,0	2,2	1,6	0,0597
30	АИР 160S2	15	2920	90,5	0,89	7	2,1	3	2,0	0,0500
31	АИР 160M2	18,5	2920	91	0,89	7	2,2	3	2,0	0,0550
32	АИР 160S4	15	1460	89,5	0,86	6,5	2,3	2,7	2,0	0,0600
33	АИР 160M4	18,5	1460	90	0,86	6,5	2,3	2,7	2,0	0,0650
34	АИР 160S6	11	970	87,5	0,81	6,5	1,9	2,6	1,7	0,0700
35	АИР 160M6	15	970	88	0,84	6,5	2,0	2,6	1,7	0,0750
36	АИР 180S2	22	2930	90,5	0,88	7,0	2,2	2,9	2,0	0,0620
37	АИР 180M2	30	2930	92	0,89	7	2,4	2,9	2,0	0,0700
38	АИР 180S4	22	1460	91	0,86	6,8	2,4	2,5	1,6	0,0700
39	АИР180M4	30	1460	91,5	0,85	7	2,4	2,5	1,7	0,0800
40	АИР 180M6	18,5	980	89,5	0,86	6,5	2,0	2,7	1,7	0,0900

Задача 2.

Имеется электропривод, кинематическая схема которого изображена на рисунке 3.6, содержащий электродвигатель ЭД, редуктор РД и рабочий орган РО. На вал рабочего органа действует статический реактивный момент M_{po} . Редуктор имеет передаточное отношение q и к.п.д. η .

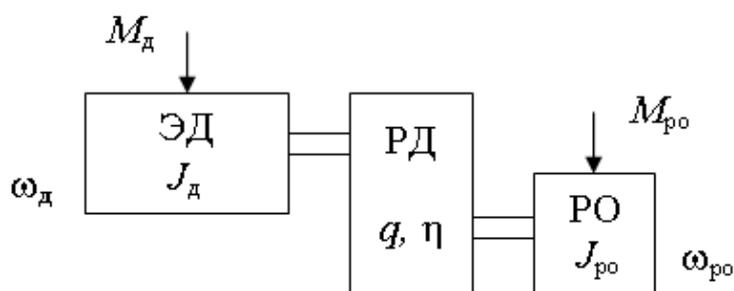


Рисунок 3.6 - Кинематическая схема электропривода

Определить: с какой скоростью ω_d должен вращаться электродвигатель и какой при этом он должен развивать момент M_d и мощность P , чтобы вращать рабочий орган со скоростью ω_{po} .

Исходные данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Вариант	$M_{po}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\omega_{po}, \text{рад/с}$	q	η
1	2	3	4	5
1	1,0	40	10	0,9
2	1,2	38	12	0,9
3	1,4	36	14	0,9
4	1,6	34	16	0,9
5	1,8	32	18	0,9
6	2,0	30	20	0,8
7	2,2	28	22	0,8
8	2,4	26	24	0,8
9	2,6	24	26	0,8
10	2,8	22	28	0,8
11	3,0	20	30	0,7
12	3,2	18	32	0,7
13	3,4	16	24	0,7
14	3,6	14	36	0,7
15	3,8	12	38	0,7
16	3,8	10	40	0,6
17	4,0	8	42	0,6
18	4,0	6	44	0,6

Задача 3.

Имеется электропривод (рисунок 3.7), содержащий электродвигатель ЭД и редуктор РД с передаточным коэффициентом q и к.п.д. η . На выходном валу редуктора укреплен барабан Б диаметром D_b , на который намотан трос. К тросу подвешен груз массой m .

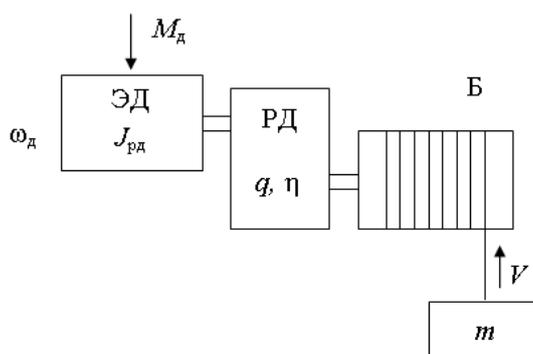


Рисунок 3.7 - Кинематическая схема электропривода

Определить: с какой скоростью ω_d должен вращаться электродвигатель и какой момент M_d и мощность при этом он должен развивать, чтобы равномерно поднимать груз со скоростью V .

Исходные данные представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Вариант	q	η	$D_6, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$m, \text{ кг}$
1	10	0,9	0,10	12,0	10
2	12	0,9	0,12	11,5	10
3	14	0,9	0,14	11,0	10
4	16	0,9	0,16	10,5	10
5	18	0,9	0,18	10,0	10
6	20	0,8	0,20	9,5	20
7	22	0,8	0,22	9,0	20
8	24	0,8	0,24	8,5	20
9	26	0,8	0,26	8,0	20
10	28	0,8	0,28	7,5	20
11	30	0,7	0,30	7,0	30
12	32	0,7	0,32	6,5	30
13	24	0,7	0,34	6,0	30
14	36	0,7	0,36	5,5	30
15	38	0,7	0,38	5,0	30
16	40	0,6	0,40	4,5	35
17	42	0,6	0,42	4,0	35
18	44	0,6	0,44	3,5	35

Задача 4.

Имеется электропривод (рисунок 3.8), содержащий электродвигатель ЭД с моментом инерции ротора $J_{рд}$, редуктор РД, имеющий передаточное отношение q и к.п.д. η , и рабочий орган РО. Момент инерции вращающихся частей рабочего органа $J_{ро}$. На вал рабочего органа действует статический реактивный момент $M_{ро}$.

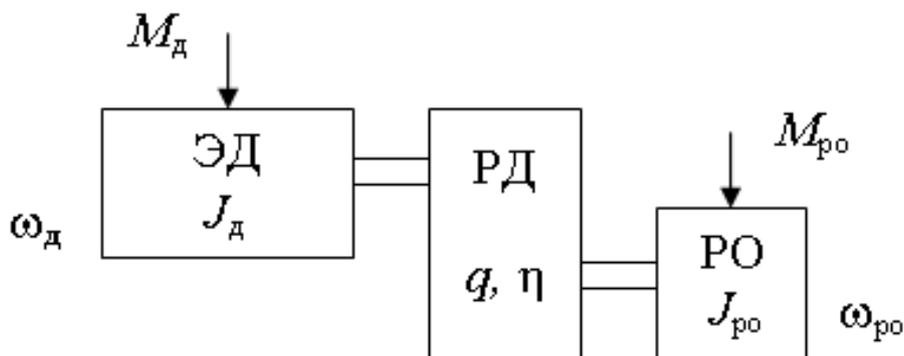


Рисунок 3.8 - Кинематическая схема электропривода

Определить: какой потребуется момент двигателя для разгона рабочего органа до скорости ω_{po} за время t_0 с постоянным ускорением, и какую максимальную мощность при этом должен развить двигатель.

Исходные данные в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Вариант	$M_{po}, \text{М}$	$\omega_{po}, \text{с}^{-1}$	q	η	$J_{рд}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$J_{po}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$t_0, \text{с}$
1	1,0	40	10	0,9	0,001	0,1	0,5
2	1,2	38	12	0,9	0,001	0,1	0,5
3	1,4	36	14	0,9	0,002	0,2	0,6
4	1,6	34	16	0,9	0,002	0,2	0,6
5	1,8	32	18	0,9	0,003	0,3	0,7
6	2,0	30	20	0,8	0,003	0,3	0,7
7	2,2	28	22	0,8	0,004	0,4	0,8
8	2,4	26	24	0,8	0,004	0,4	0,8
9	2,6	24	26	0,8	0,005	0,5	0,9
10	2,8	22	28	0,8	0,005	0,5	0,9
11	3,0	20	30	0,7	0,006	0,6	1,0
12	3,2	18	32	0,7	0,006	0,6	1,0
13	3,4	16	24	0,7	0,007	0,7	1,1
14	3,6	14	36	0,7	0,007	0,7	1,1
15	3,8	12	38	0,7	0,008	0,8	1,2
16	3,8	10	40	0,6	0,008	0,8	1,2
17	4,0	8	42	0,6	0,006	0,6	1,0
18	4,0	6	44	0,6	0,006	0,6	1,0

Задача 5.

Имеется электропривод (рисунок 3.9), содержащий электродвигатель ЭД с моментом инерции ротора $J_{рд}$ и редуктор РД с передаточным коэффициентом q и к.п.д. η . На выходном валу редуктора укреплен барабан Б диаметром $D_б$ и моментом инерции J_{po} , на который намотан трос. К тросу подвешен груз массой m .

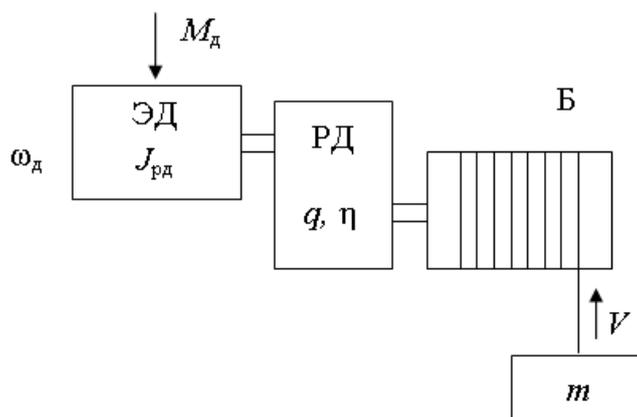


Рисунок 3.9 - Кинематическая схема электропривода

Определить: какой потребуется момент двигателя для того, чтобы поднять груз, равномерно увеличивая скорость подъема, за время t_0 на высоту h .

Исходные данные в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Вариант	q	η	D_0 , м	m , кг	$J_{рл}$, кг·м ²	$J_{ро}$, кг·м ²	t_0 , с	h , м
1	10	0,9	0,10	10	0,001	0,1	0,5	0,5
2	12	0,9	0,12	10	0,001	0,1	0,5	0,5
3	14	0,9	0,14	10	0,002	0,2	0,6	0,6
4	16	0,9	0,16	10	0,002	0,2	0,6	0,6
5	18	0,9	0,18	10	0,003	0,3	0,7	0,7
6	20	0,8	0,20	20	0,003	0,3	0,7	0,7
7	22	0,8	0,22	20	0,004	0,4	0,8	0,8
8	24	0,8	0,24	20	0,004	0,4	0,8	0,8
9	26	0,8	0,26	20	0,005	0,5	0,9	0,9
10	28	0,8	0,28	20	0,005	0,5	0,9	0,9
11	30	0,7	0,30	30	0,006	0,6	1,0	1,0
12	32	0,7	0,32	30	0,006	0,6	1,0	1,0
13	24	0,7	0,34	30	0,007	0,7	1,1	1,1
14	36	0,7	0,36	30	0,007	0,7	1,1	1,1
15	38	0,7	0,38	30	0,008	0,8	1,2	1,2
16	40	0,6	0,40	35	0,008	0,8	1,2	1,2
17	42	0,6	0,42	35	0,006	0,6	1,0	1,4
18	44	0,6	0,44	35	0,006	0,6	1,0	1,4

4 Режимы работы, выбор электродвигателя

4.1 Примеры решения задач

Задача 1.

Нагрузочная диаграмма механизма задана повторяющимся циклом в соответствии с рисунком 4.1. Для привода механизма выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с синхронной частотой 1500 мин^{-1} . Выбор провести методом эквивалентной мощности, проверить выбранный электродвигатель методом средних потерь. Выполнить проверку на перегрузочную способность.

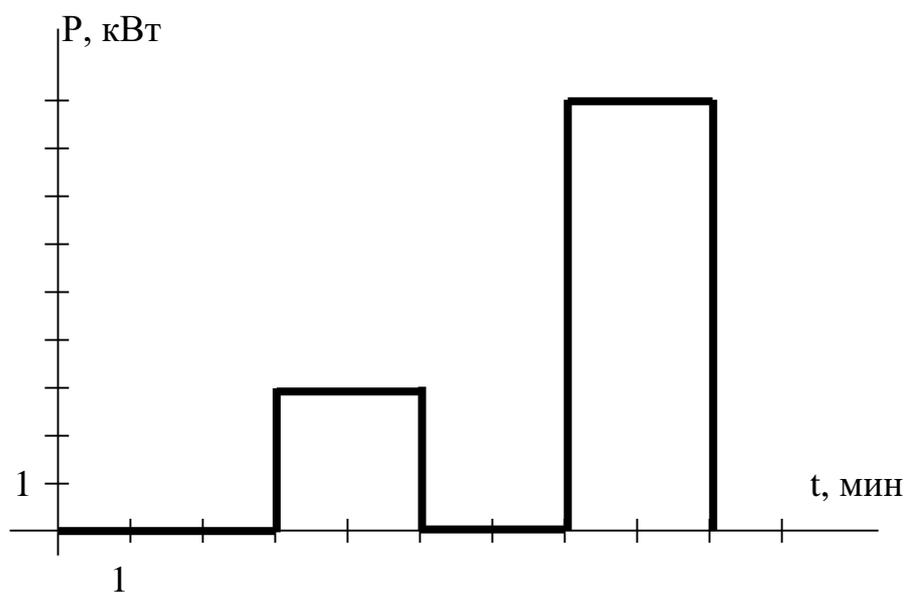


Рисунок 4.1 - Нагрузочная диаграмма электропривода

Решение:

Т. к. в дальнейшем диаграмма повторяется, расчеты будем проводить на одном ее цикле, изображенном на рисунке 4.1.

Используя метод эквивалентной мощности, проведем расчет необходимой мощности привода. Согласно диаграмме режим работы привода – S3 повторно-кратковременный с продолжительностью включения

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{ц}}} 100\%,$$

$$\text{ПВ}\% = (4/9) \cdot 100\% = 44\%.$$

где $t_p = 2+2 = 4$ мин – время работы двигателя за цикл нагрузочной диаграммы,

$t_{\text{ц}} = 3+2+2+2 = 9$ мин – длительность цикла.

Эквивалентная мощность нагрузки

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i}},$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{(0^2 \cdot 3 + 9^2 \cdot 2 + 0^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2) / (3 + 2 + 2 + 2)} = 4,5 \text{ кВт}$$

Для привода механизма будем использовать двигатель, предназначенный заводом изготовителем для длительного режима работы. Поэтому его стандартной ПВ_{ст}% считаем 100%. Мощность выбираемого двигателя должна удовлетворять условию

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{н}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{\text{ПВ}_{\text{ст}}\%}},$$

$$P_{\text{н}} \geq 4,5 \sqrt{\frac{44}{100}} = 2,9 \text{ кВт.}$$

Выбираем двигатель 4А100S4У3 (приложение 1)

С параметрами

Номинальная мощность $P_{\text{н}} = 3 \text{ кВт}$,

Номинальное скольжение $s_{\text{н}} = 5,3 \%$,

Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,82$,

Номинальный КПД $\eta_{\text{н}} = 83 \%$,

Кратность пускового момента $\mu_{\text{п}} = 2$,

Кратность критического момента $\mu_{\text{к}} = 2,2$,

Кратность минимального момента $\mu_{\text{мин}} = 1,6$,

Кратность пускового тока $K_i = 6,5$.

Проверим выбранный двигатель на перегрузочную способность. Максимальная мощность по нагрузочной диаграмме $P_{i.\text{max}} = 9 \text{ кВт}$.

Проверим выполнение условия перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.\text{max}}}{M_{\text{н}}} < \mu_{\text{к}} - 0,25.$$

Т.к. скорость вращения при работе асинхронного двигателя меняется незначительно, отношение моментов можно заменить отношением мощностей. Тогда условие переписывается в виде

$$\frac{P_{i.max}}{P_H} < \mu_k - 0,25.$$

$$9/3 = 3 > 2,2 - 0,25 = 1,95$$

Для двигателя 4А100L4У3 мощностью 4 кВт условие перегрузочной способности

$$9/4 = 2,25 > 2,2 - 0,25 = 1,95$$

Условие также не выполняется.

Выбираем двигатель– 4А112М4У3

С параметрами

Номинальная мощность $P_H = 5,5$ кВт ,

Номинальное скольжение $s_H = 5$ % ,

Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,86$,

Номинальный КПД $\eta_H = 85,5$ % ,

Кратность пускового момента $\mu_n = 2$,

Кратность критического момента $\mu_k = 2,2$,

Кратность минимального момента $\mu_{min} = 1,6$,

Кратность пускового тока $K_i = 7$.

Для которого условие перегрузочной способности выполняется.

$$9/5,5 = 1,64 < 2,2 - 0,25 = 1,95$$

Методы эквивалентных величин не точно учитывают постоянные потери в двигателе, поэтому проверим двигатель по нагреву более точным методом средних потерь. Для этого найдем номинальные потери двигателя по формуле

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H},$$

$$\Delta P_H = 5500 \cdot (1 - 0,855) / 0,855 = 1127 \text{ Вт.}$$

Для асинхронных двигателей базового закрытого исполнения отношение постоянных и переменных потерь

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v.H.}} \approx 0,5$$

поэтому треть номинальных потерь составляют постоянные потери, а две трети – переменные потери.

$$\Delta P_c = \Delta P_H / 3 = 1127 / 3 = 376 \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{v.н} = 2 \cdot \Delta P_n / 3 = 2 \cdot 1127 / 3 = 751 \text{ Вт.}$$

По формуле

$$\Delta P_i = \Delta P_c + \Delta P_{v.н} \cdot \left(\frac{P_i}{P_n} \right)^2$$

найдем потери на каждом участке нагрузочной диаграммы

$$\Delta P_1 = 0 \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_2 = 376 + 751 \cdot (9/5,5)^2 = 2387 \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_3 = 0 \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_4 = 376 + 751 \cdot (2/5,5)^2 = 475 \text{ Вт.}$$

Средние потери за цикл

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{\sum t_i},$$

$$\Delta P_{cp} = (2387 + 475) / (3 + 2 + 2 + 2) = 318 \text{ Вт}$$

Тепловой режим двигателя не будет нарушен, если средние потери не превысят номинальных потерь двигателя, т.е.

$$\Delta P_{cp} = 318 \text{ Вт} < \Delta P_n = 1127 \text{ Вт.}$$

Условие выполняется, поэтому тепловой режим работы двигателя не будет нарушен.

Задача 2.

Выбрать приводной асинхронный электродвигатель с синхронной частотой 1500 мин^{-1} для механизма, работающего в кратковременном режиме. Время работы 6 мин, нагрузка на валу двигателя 3 кВт.

Решение:

В кратковременном режиме температура двигателя не успевает достигнуть установившихся значений, поэтому для привода можно использовать двигатель номинальной мощностью меньше, чем мощность на валу на участке работы.

Предварительно выбираем двигатель 4А80В4У3

С параметрами

Номинальная мощность $P_n = 1,5 \text{ кВт}$,

Номинальное скольжение $s_n = 6,7 \%$,
 Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,83$,
 Номинальный КПД $\eta_n = 77 \%$,
 Кратность пускового момента $\mu_n = 2$,
 Кратность критического момента $\mu_k = 2,2$,
 Кратность минимального момента $\mu_{min} = 1,6$,
 Кратность пускового тока $K_i = 5$.

Постоянную времени нагрева в минутах можно найти по эмпирической формуле

$$T_H = 6 \frac{m \theta_n \eta_n}{P_H (1 - \eta_n)},$$

где m - масса электродвигателя, кг;

θ_n - нормированное превышение температуры двигателя при номинальной нагрузке при измерении методом сопротивления, град;

η_n - номинальный КПД двигателя;

P_H - номинальная мощность двигателя, Вт.

$$T_H = 6 \frac{21,3 \cdot 80 \cdot 0,77}{1500(1 - 0,77)} = 22,8 \text{ мин.}$$

Выбранный электродвигатель должен удовлетворять условию

$$P_H \geq P_э \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{p.ст.}}{T_H}}}},$$

где $P_э$ – эквивалентная мощность нагрузки на рабочем участке.

$t_{p.ст.}$ - стандартное время работы двигателя.

Если условие выполняется со значительным запасом, это говорит о завышенной мощности двигателя.

Выбираемый двигатель предназначен заводом изготовителем для длительного режима S1, поэтому его стандартное время работы принимаем $t_{p.ст.} = \infty$ и условие запишется в виде

$$P_H \geq 3 \sqrt{1 - e^{-\frac{t_{раб}}{T_H}}}$$

$$1,5 \geq 3 \sqrt{1 - e^{-\frac{6}{22,8}}} = 1,43.$$

Условие выполняется, значит тепловой режим электродвигателя не будет нарушен.

Проверим выбранный двигатель на перегрузочную способность. Максимальная мощность во время работы $P_{max}=3$ кВт.

Условие перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.max.}}{M_H} < \mu_k - 0,25.$$

Т.к. скорость вращения при работе асинхронного двигателя меняется незначительно, отношение моментов можно заменить отношением мощностей. Тогда условие переписывается в виде

$$\frac{P_{i.max.}}{P_H} < \mu_k - 0,25,$$

$$\frac{3}{1,5} = 2 \geq 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Условие не выполняется, необходимо увеличивать мощность двигателя или, при возможности, использовать двигатель с большей перегрузочной способностью.

Выбираем двигатель на одну ступень большей мощности 4А90L4У3

С параметрами

Номинальная мощность $P_H = 2,2$ кВт ,

Номинальное скольжение $s_H = 5,4$ % ,

Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,83$,

Номинальный КПД $\eta_H = 80$ % ,

Кратность пускового момента $\mu_H = 2$,

Кратность критического момента $\mu_k = 2,2$,

Кратность минимального момента $\mu_{min} = 1,6$,

Кратность пускового тока $K_i = 6$.

Проверка по нагреву не требуется, так как гарантировано будет выполняться.

Проведем проверку на перегрузочную способность.

$$\frac{3}{2,2} = 1,36 \leq 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Условие выполняется, двигатель выбран верно.

4.2 Расчет нагрузки привода для некоторых производственных механизмов

Для вычисления нагрузки *насосной установки* необходимо определить среднесуточный расход воды

$$Q_{cp.cym.} = \sum Q_i + Q_n,$$

где Q_i – суточная норма расхода воды отдельными потребителями,
 Q_n – пожарный расход воды 2,5 – 10 л/с.

Подача насоса (м³/ч)

$$Q_n \geq Q_{maz.ч.} = \frac{k_u k_c Q_{cp.cym.}}{24 \eta_y 3600},$$

где $Q_{maz.ч.}$ – возможный максимальный часовой расход воды, м³/ч;
 k_u – коэффициент неравномерности часового расхода ($k_u = 1,5 \dots 2,5$ для фермы с автопоилками, $k_u = 2 \dots 3$ для фермы без автопоилок);
 k_c – коэффициент неравномерности суточного расхода ($k_c = 1,1 \dots 1,3$);
 η_y – КПД установки, учитывающий потери воды ($\eta_y = 0,9$).

Полный напор (м), который должен обеспечивать насос

$$H_n \geq H_z + H_n + H_{св},$$

где H_z – геодезический напор – высота воды от нижнего до верхнего уровня;
 H_n – потери напора во всасывающем и напорном трубопроводах;
 $H_{св}$ – свободный напор на истечение воды.

Мощность на валу электродвигателя привода насоса

$$P_d = 9,81 \frac{k_3 Q_n H_n}{\eta_n \eta_n},$$

где k_3 – коэффициент запаса, зависящий от мощности (таблица 2);
 η_n – КПД механической передачи (для прямой передачи 1, для зубчатой – 0,97, клиноременной – 0,98, плоскоременной – 0,95);
 η_n – КПД насоса (для поршневых насосов 0,7...0,9; центробежных – 0,4...0,8; вихревых – 0,25...0,5).

Таблица 4.1 - Значение k_3 в зависимости от мощности

P , кВт	≤ 1	2	3	4	5	8	≥ 10
k_3	1,7...2	1,5	1,33	1,25	1,2	1,12	1,05...1,1

Мощность на валу привода вентилятора (компрессора, вакуум насоса)

$$P = k \frac{Lp}{\eta_v \eta_n},$$

где k – коэффициент запаса, зависящий от мощности (таблица 3);

L – подача вентилятора, м³/с;

p – необходимое давление, Па;

η_v, η_n – КПД вентилятора и передачи (для клиноременной передачи $\eta_n = 0,9 \dots 0,95$).

Таблица 4.2 - Значение коэффициента запаса k

Р, кВт	До 0,5	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...3,0	3,0 и выше
Для центробежного вентилятора	1,5	1,3	1,2	1,15	1,1
Для осевого вентилятора	1,2	1,15	1,1	1,05	1,05

Необходимые подача и давление вентилятора для животноводческого помещения вычисляются на основе требуемого воздухообмена.

Мощность нагрузки (кВт) на валу *дробилки кормов, измельчителя, прессы*

$$P = \frac{k_l A Q}{\eta_n},$$

где Q – производительность, кг/с;

k_l – коэффициент, учитывающий потери холостого хода, включая расход мощности на вентиляцию ($k_l = 1,15 \dots 1,2$);

A – энергия расходуемая для измельчения материала, кДж/кг (для корнеплодов $A=13$ кДж/кг, для зерна при среднем и тонком помоле $A=40 \dots 70$ кДж/кг, при измельчении зерна в муку $A=100 \dots 150$ кДж/кг);

η_n – КПД передачи.

Мощность нагрузки на валу (кВт) электропривода *измельчителя кормов*

$$P = \frac{k_{x.x} A Q}{\eta_n},$$

где Q – производительность, т/ч;

$k_{x.x}$ – коэффициент, учитывающий потери холостого хода ($k_{x.x} = 1,15 \dots 1,2$);

A – удельные затраты энергии на измельчение кормов, кВт·ч/т (грубые корма $A=1,7 \dots 8$ кВт·ч/т, корнеклубнеплоды $A=1,2 \dots 1,3$ кВт·ч/т);

η_n – КПД передачи.

Мощность нагрузки на валу (кВт) электропривода *цепочно-скребкового кормораздатчика*

$$P = \frac{Fv \cdot 10^{-3}}{\eta_n},$$

где F – сопротивление транспортера, Н;
 v – скорость передвижения скребков, м/с;
 η_n – КПД передачи.

Общее тяговое усилие

$$F = F_{x.x.} + F_{\delta} + F_T + F_{\varepsilon},$$

где $F_{x.x.} = 9,81mL_{ц}f_0$ – сопротивление перемещения транспортера по кормушке на холостом ходу, Н;

m – масса 1 м длины транспортера, кг/м;

$L_{ц}$ – длина цепи транспортера, м;

f_0 – приведенный коэффициент трения ($f_0 = 0,4 \dots 0,45$);

$F_{x.x.} = 9,81m_{y\delta}L_{к}f$ – сопротивление трения кормов о дно кормушки, Н;

$m_{y\delta}$ – масса корма на 1 м длины транспортера, кг/м;

$L_{к}$ – расстояние перемещения корма, м;

f – коэффициент трения корма о дно кормушек;

$F_T = 2kF_{\delta}$ – сопротивление кормов о боковые стенки кормушки, Н;

k – коэффициент бокового давления ($k = 0,5 \dots 0,6$);

$F_T = q_1n$ – сопротивление возможного заклинивания корма между скребками и стенками кормушки, Н;

q_1 – сопротивление от заклинивания одного скребка, Н;

n – число скребков.

Мощность нагрузки на валу (кВт) электропривода *цепочно-скребкового навозоуборщика*

$$P = \frac{Fv \cdot 10^{-3}}{\eta_n},$$

где F – полное усилие на цепочно-скребковом транспортере, Н;

v – скорость движения цепи, м/с (принимают $0,15 \dots 0,2$ м/с);

η_n – КПД передачи ($\eta_n = 0,75 \dots 0,85$).

Полное усилие на цепочно-скребковом транспортере

$$F = 9,81 \frac{Q_{сум}}{k_{y\delta}} kf_1 + L \left(\frac{F_c}{t_c} + 9,81m_T f_2 \right),$$

где Q – суточный выход навоза, кг/сут;
 $k_{уб}$ – число включений транспортера для уборки в сутки;
 k – коэффициент, учитывающий неравномерность накопления навоза в интервалах между уборками и добавочные усилия, связанные с перемещением навоза по каналу ($k = 3 \dots 5$);
 f_1 – коэффициент трения навоза о желоб;
 L – длина цепи, м;
 F_c – усилие, приходящееся на один скребок, Н ($F_c = 15 \dots 30$ Н);
 t_c – шаг скребков, м ($t_c = 0,1 \dots 1$ м);
 m_T – масса транспортера длиной 1 м, кг/м;
 f_2 – опытный коэффициент ($f_2 = 0,4 \dots 0,5$).

Мощность нагрузки на валу (кВт) электропривода подъема груза *электротали* может быть найдена по формуле

$$P = \frac{9,81mv \cdot 10^{-3}}{\eta_n},$$

где m – суммарная масса груза, троса, крюка, кг;
 v – скорость подъема груза, м/с;
 η_{cm} – КПД передачи ($\eta_n = 0,9 \dots 0,95$).

Мощность перемещения по рельсу

$$P = \frac{9,81mfv \cdot 10^{-3}}{\eta_n},$$

где m – суммарная масса груза, троса, крюка и др. перемещаемых частей тали, кг;
 v – скорость движения, м/с;
 f – коэффициент сопротивления перемещению ($f = 0,1 \dots 0,15$);
 η_{cm} – КПД передачи ($\eta_n = 0,85 \dots 0,9$).

4.3 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.

Найти мощность привода скребкового транспортера длиной 10 м, с расстоянием между скребками 0,5 м и КПД передачи 0,93. Объем материала перед скребком 0,025 м³; насыпная плотность 450 кг/м³; скорость движения 0,4 м/с; коэффициент сопротивления движению 2. Выбрать электродвигатель и автоматический выключатель для защиты электродвигателя.

Задача 2.

Рассчитать мощность привода, работающего в режиме 47Нм (10мин), 65Нм (5 мин) и 23Нм (12 мин) при частоте вращения 140 с^{-1} . Выбрать электродвигатель, кабель для подключения и способ его монтажа.

Задача 3.

Рассчитать мощность привода вентилятора с расчетным воздухообменом $15000 \text{ м}^3/\text{ч}$, давлением 340 Па, КПД вентилятора 0,55 и КПД передачи - 0,95. Изобразить силовую часть схемы 3-х ступенчатого регулирования производительности вентилятора.

Задача 4.

Определить мощность и выбрать электродвигатель привода молочного насоса с номинальной производительностью по молоку $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $2 \cdot 10^5$ Па. Известно, что КПД насоса в длительном режиме работы равен 0,7.

Задача 5.

Выбрать электродвигатель для привода пресса, если удельные затраты энергии на прессование $A=7,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$, КПД пресса - 0,9 и КПД ременной передачи - 0,95. Выбрать магнитный пускатель для дистанционного управления электродвигателем привода пресса.

Задача 6.

Рассчитать мощность электродвигателя привода подъёмника для подъема груза массой 1 т с помощью крюка массой 50 кг и скорости подъема груза 10 м/мин. КПД передачи равен 0,85, режим работы $t_p=20 \text{ с}$, $t_{\text{паузы}}=45 \text{ с}$. Определить сечение, тип и способ прокладки кабеля к электродвигателю.

Задача 7.

Определить мощность привода нории, если коэффициент заполнения ковшей - 0,8; насыпная плотность материала - $650 \text{ кг}/\text{м}^3$; скорость движения ковшей - 2 м/с; вместимость ковша - $0,01 \text{ м}^3$; расстояние между ковшами - 0,5 м; высота нории - 15 м; КПД передачи - 0,83.

Задача 8.

Выбрать 4-х полюсный электродвигатель для привода поршневого компрессора производительностью $1 \text{ м}^3/\text{мин}$ и давлением 1 атм.

Задача 9.

Рассчитать мощность привода мобильного транспортного средства при тяговом сопротивлении плуга 800 Н, сопротивлении от волочения троса по почве 95Н, скорости движения 4м/с, КПД передачи 0,89 и КПД транспортного средства 0,8. Выбрать электродвигатель серии 4А и разработать схему реверсивного управления с двух мест электропривода мобильного транспортного средства с кабельным питанием от сети 380/220 В.

Задача 10.

Рассчитать мощность и выбрать электродвигатель для привода молочного насоса с подачей $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, глубиной вакуума $5,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$, если КПД насоса - 0,6 и КПД передачи - 0,94.

Задача 11.

Определить значения потребной мощности вентилятора Ц4-70 № 7 при производительности $Q=5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, полном давлении $H=1275 \text{ Па}$, частоте вращения $n=1456 \text{ об/мин}$, КПД вентилятора 0,78 и КПД передачи 1. Выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, принимая коэффициент $K_{\text{зап}}=1,1$.

Задача 12.

Рассчитать мощность и подобрать электродвигатель шнека длиной 5 м линии загрузки комбикормов производительностью 10 кг/с , высотой подъема 4 м с коэффициентом сопротивления - 2,4 и общим КПД 0,8, если ПВ=60%. Выбрать кабель для подключения шкафа управления электродвигателем шнека к распределительному шкафу.

Задача 13.

Рассчитать мощность привода скребкового транспортера длиной 18 м с расстоянием между скребками 0,5 м и КПД передачи 0,93. Материал объемом перед скребком $0,025 \text{ м}^3$ с насыпной плотностью 450 кг/м^3 движется со скоростью $0,4 \text{ м/с}$ и коэффициентом сопротивления 2.

Задача 14.

Выбрать погружной насос, если статический уровень воды в скважине 70 м, динамический - 90 м, геодезический напор равен 85 м и потери напора в напорном трубопроводе равны 11 м.

Задача 15.

Рассчитать мощность привода шнека производительностью 15 т/ч , с коэффициентом сопротивления перемещению 1,85 при проекциях транспортера- горизонтальная 10 м, вертикальная 5 м и общем КПД 0,75.

Задача 16.

Рассчитать мощность привода при моментах сопротивлений – 47, 65 и 23 Нм, действующих соответственно в течение 10, 5 и 12 мин, и частоте вращения вала машины - 140 с^{-1} .

Задача 17.

Рассчитать мощность, необходимую на привод вентилятора, если требуемый воздухообмен составляет $15000 \text{ м}^3/\text{ч}$; расчетное давление 340 Па; КПД вентилятора - 0,55; КПД передачи - 0,95. Изобразить схему 3-х ступенчатого управления электроприводом вентилятора.

Задача 18.

Рассчитать мощность электродвигателя привода подъёмника для подъема груза массой 1 т с помощью крюка массой 50 кг и скорости подъема груза 10 м/мин. КПД передачи равен 0,8, режим работы $t_p=30$ с, $t_{паузы}=40$ с. Определить сечение, тип и способ прокладки кабеля к электродвигателю.

Задача 19.

Найти мощность привода скребкового транспортера длиной 10 м, с расстоянием между скребками 0,5 м и КПД передачи 0,93. Объем материала перед скребком $0,025$ м³; насыпная плотность 450 кг/м³; скорость движения $0,4$ м/с; коэффициент сопротивления движению 2. Выбрать электродвигатель и автоматический выключатель для защиты электродвигателя.

Задача 20.

Определить мощность и выбрать электродвигатель привода молочного насоса с номинальной производительностью по молоку 15 м³/ч и напором $2 \cdot 10^5$ Па. Известно, что КПД насоса в длительном режиме работы равен 0,7.

Задача 21.

Рассчитать мощность, необходимую на привод вентилятора, если требуемый воздухообмен составляет 15000 м³/ч; расчетное давление 340 Па; КПД вентилятора - 0,55; КПД передачи - 0,95.

4.4 Контрольные задания

Задача 1.

Для вариантов задачи данные содержатся в таблице 4.3, где указаны мощность и время участков нагрузочной диаграммы. На 4-м участке двигатель остановлен. Необходимо выбрать асинхронный двигатель с синхронной частотой вращения $n_1 = 1500$ мин⁻¹, если $T_{окр}=25^0$. Задачу решить методом эквивалентной мощности, проверку выбранного двигателя провести методом средних потерь и осуществить проверку двигателя на перегрузочную способность. Характеристики электродвигателей указаны в приложении 1.

Таблица 4.3

Вариант	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	P_4 , кВт	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_4 , с
1	2,5	5,8	6,3	0	14	21	17	68
2	13,1	4,7	10,4	0	30	12	26	77
3	3,5	5,5	6,5	0	12	24	15	70
4	12	4,0	9,0	0	24	16	19	76
5	10,1	4,5	9,2	0	15	22	16	68
6	8,5	3,5	4,6	0	19	31	19	67
7	12,4	16,1	13	0	16	13	12	43
8	13	15,5	8	0	20	8	10	43
9	12,6	15,9	10	0	19	10	5	37
10	13,5	15,2	10	0	15	8	10	60
11	10	10,2	23	0	10	14	6	44
12	14	21	7,5	0	10	15	16	51
13	12	23	7	0	16	12	22	25
14	10	9,7	19	0	15	21	12	36
15	3,8	4,7	5,9	0	15	21	10	38
16	4,8	5,2	6,7	0	16	10	7	50
17	5,3	4,9	4,8	0	13	22	16	41
18	4	4	10	0	20	15	16	30
19	5,1	6,3	10,5	0	15	17	13	30
20	10,1	13,1	5,5	0	13	10	21	35
21	9,5	8,6	12,2	0	12	10	15	53
22	10	9,5	16,5	0	15	10	12,5	49
23	11,5	10,1	20	0	15	16	8	50
24	11	15	13,5	0	15	12	10	37
25	6,5	12	14	0	16	18	15	28
26	7,5	8	20	0	15	14	8	37
27	9,5	16	13	0	14	10	12	51
28	10,1	13	14,5	0	18	13	16	34
29	12,3	15,5	21	0	10	15	13	39
30	8,6	8,6	19	0	20	10	5	47
31	7,3	13,5	19,5	0	16	12	10	36
32	9,6	14	18	0	25	10	16	50
33	10,5	12,1	14	0	10	13	10	57
34	14	15,2	16	0	17	11	5	52
35	13	14	17	0	12	25	10	48
36	8	8,7	18,5	0	26	9	7	45
37	7	9	19	0	15	17	8	48
38	3,8	9,5	20	0	18	20	17	33
39	6,5	9,9	20,5	0	16	25	17	35
40	12,5	10,2	19,5	0	15	21	17	39

Задача 2.

Для вариантов задачи в таблице 4.4 приведены значения моментов M_1 , M_2 , M_3 на валу двигателя для соответствующих участков графика нагрузки, время работы t_1 , t_2 , t_3 двигателя с заданными моментами нагрузки, время паузы t_0 , частота вращения двигателя.

Определить для заданного варианта расчетную мощность двигателя и выбрать по каталогу (приложение 1) асинхронный двигатель, предназначенный для привода механизма с циклическим графиком нагрузки в повторно-кратковременном режиме работы. Провести проверку двигателя по перегрузочной способности.

Таблица 4.4

Вариант	M_1 , Н м.	M_2 , Н м.	M_3 , Н м.	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	n_{2H} , МИН ⁻¹
1	80	40	60	10	5	20	25	1410
2	120	100	95	10	10	15	55	930
3	50	20	30	10	15	10	55	915
4	150	125	145	10	20	10	60	930
5	150	130	160	10	25	20	35	1415
6	40	30	10	5	15	20	50	930
7	40	25	20	5	15	15	55	1420
8	30	15	25	5	20	10	55	950
9	20	15	10	5	10	5	60	935
10	180	140	150	5	15	15	25	1440
11	30	20	10	15	10	20	55	1440
12	30	40	60	15	5	15	55	1400
13	30	45	20	15	10	10	55	1410
14	30	50	30	15	15	10	50	940
15	200	180	170	15	20	5	60	930
16	220	230	215	10	15	10	25	940
17	20	15	25	10	10	15	55	930
18	20	45	40	10	5	10	75	950
19	25	20	15	10	15	15	60	950
20	20	25	15	10	10	5	20	1440
21	25	50	40	15	15	20	55	1400
22	25	20	10	15	15	2	25	950
23	20	35	10	15	15	10	30	920
24	25	40	10	15	15	15	55	930
25	25	15	10	15	10	20	55	950
26	245	230	240	5	10	10	40	940
27	60	50	55	5	15	25	10	1410
28	45	10	20	5	20	10	50	950
29	45	15	10	5	10	10	75	950
30	40	20	10	5	20	5	20	1440
31	100	50	60	15	10	15	20	1410
32	110	90	100	15	10	15	50	930
33	55	25	30	10	20	15	55	915
34	140	105	130	10	15	15	55	930
35	160	120	100	5	10	10	30	1440

Продолжение таблицы 4.4

Вариант	M_1 , Н м.	M_2 , Н м.	M_3 , Н м.	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	n_{2H} , МИН ⁻¹
35	25	35	55	15	10	10	55	1400
37	20	15	20	10	15	20	40	930
38	20	45	40	5	10	10	65	950
39	15	35	30	10	15	20	45	950
40	145	100	90	5	10	15	30	1440
41	20	15	10	15	10	5	40	1440
42	130	105	140	5	15	5	40	930
43	30	25	10	15	10	20	50	1410
44	50	40	30	5	15	10	45	1410
45	40	25	35	5	20	10	50	950
46	190	180	150	10	15	5	60	930
47	200	215	205	10	5	15	25	940
48	210	205	195	5	15	10	35	950
49	25	20	10	10	15	15	50	950
50	20	25	15	10	10	10	35	1440
51	20	15	10	15	10	15	40	1400
52	15	30	10	10	15	5	40	950
53	25	40	10	15	10	25	45	950
54	20	35	40	10	15	15	40	920
55	20	10	15	15	10	25	45	950
56	230	215	210	5	10	5	40	940
57	55	40	50	5	10	20	30	1410
58	40	15	25	5	15	25	50	950
59	40	20	10	5	15	10	60	950
60	35	20	15	10	15	5	35	1440

5 Проверка возможности пуска и устойчивости работы электродвигателей

5.1 Примеры решения задач

Задача 1. Проверить двигатель на возможность пуска с номинальной нагрузкой на валу при питании от трансформатора ТМ – 63/10 с номинальной мощностью $S_n = 63$ кВА, номинальным выходным фазным напряжением $U_{2n} = 220$ В, напряжением короткого замыкания $u_k = 8,5$ % через линию электропередач длиной 200 м, выполненную проводом АС – 16 с погонным сопротивлением $r_n = 2,2$ Ом/км.

Характеристики электродвигателя:

Тип – 4А112М4У3

Номинальная мощность $P_n = 5,5$ кВт ,

Номинальное скольжение $s_n = 5$ % ,

Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,86$,

Номинальный КПД $\eta_n = 85,5$ % ,

Кратность пускового момента $\mu_n = 2$,

Кратность критического момента $\mu_k = 2,2$,

Кратность минимального момента $\mu_{min} = 1,6$,

Кратность пускового тока $K_i = 7$.

Решение:

Для проверки двигателя на возможность пуска найдем максимально допустимое падение напряжения при пуске двигателя

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1 - \sqrt{\frac{M_{\text{изб}}^0 + M_{\text{тр}}^0}{\mu_{\text{п}}}}$$

где $M_{\text{изб}}^0$ – относительный (к номинальному) избыточный момент, идущий на разгон электропривода. Обычно принимают $M_{\text{изб}}^0 = 0,25$.

$M_{\text{тр}}^0$ – относительный момент трогания – момент сопротивления на валу двигателя при пуске.

$M_{\text{тр}}^0 = 1$, т.к. запуск проводится с номинальной нагрузкой.

Выбранный двигатель имеет провал в механической характеристике и если момент сопротивления на валу при пуске будет больше минимального и меньше пускового, разгон прекратится на частоте около 20% от синхронной. Поэтому при пуске необходимо, чтобы момент на валу не превышал минимальный, а в формуле 30 использовать кратность минимального момента μ_{min} .

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1 - \sqrt{\frac{M_{\text{изб}}^0 + M_{\text{тр}}^0}{\mu_{min}}}$$

$$\Delta U_{\text{дон}} = 1 - \sqrt{(1+0,25)/1,6} = 0,12.$$

Найдем падение напряжения на зажимах двигателя при пуске, которое будет складываться из падения напряжения в трансформаторе и падения напряжения в линии. Для расчетов потребуется пусковой ток двигателя $I_{n.\text{дв.}}$ и номинальный ток трансформатора $I_{n.\text{тр.}}$. Вычислим их.

Пусковой ток двигателя

$$I_{\text{п.дв.}} = K_I \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \eta_n \cos\varphi},$$

где K_I – кратность пускового тока двигателя,
 P_n , U_n , η_n – номинальные мощность, напряжение и КПД двигателя,
 $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

$$I_{n.\text{дв.}} = (6 \cdot 5500) / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,83) = 72 \text{ А.}$$

Номинальный ток трансформатора

$$I_{\text{н.тр.}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n},$$

где S_n , U_n – номинальные мощность и напряжение трансформатора.

$$I_{\text{н.тр.}} = 63000 / (1,73 \cdot 400) = 91 \text{ А.}$$

Падение напряжения в линии

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{I_{\text{п.дв.}} \cdot l \sqrt{R_{\text{л}}^2 + x_{\text{л}}^2}}{U_n},$$

где l – длина линии,
 $R_{\text{л}}$ – активное погонное сопротивление линии,
 $x_{\text{л}}$ – реактивное погонное сопротивление линии, принимается 0,4 Ом/км
 для воздушной линии 0,4 кВ,
 U_n – номинальное фазное напряжение питания,
 $I_{n.\text{дв.}}$ – пусковой ток двигателя.

$$\Delta U_{\text{л}} = (72 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2,2^2 + 0,4^2}) / 220 = 0,146$$

Падение напряжения в трансформаторе

$$\Delta U_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{к}}\% I_{\text{п.дв.}}}{100 I_{\text{н.тр.}}},$$

где $u_{\text{к}}\%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора.

$$\Delta U_{\text{тр}} = (8,5 \cdot 72) / (91 \cdot 100) = 0,067.$$

Суммарное падение напряжения

$$\Delta U = \Delta U_{\text{л}} + \Delta U_{\text{тр}} = 0,146 + 0,067 = 0,214,$$

что больше максимально допустимого 0,12. Поэтому двигатель не запустится.

Для обеспечения пуска можно предложить следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сократить длину линии за счет рационального расположения питающей ТП, использовать трансформатор большей мощности или трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания.

Для обеспечения пуска двигателя М1 можно предложить следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сократить длину линии за счет рационального расположения питающей ТП, использовать трансформатор большей мощности или трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания.

Будем использовать провод большего сечения, чтобы снизить суммарные потери до максимально допустимого, т.е. на $0,214 - 0,12 = 0,094$. Пропорционально снижению потерь необходимо увеличить сечение провода не менее чем в $0,146 / (0,146 - 0,094) = 2,8$ раза.

Выбираем провод А-50 с погонным сопротивлением 0,7 Ом/км. Падение напряжения в линии составит

$$\Delta U_{\text{л}} = (72 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{0,7^2 + 0,4^2}) / 220 = 0,046,$$

а суммарное падение напряжения

$$\Delta U = \Delta U_{\text{л}} + \Delta U_{\text{тр}} = 0,046 + 0,067 = 0,114,$$

Что меньше максимально допустимого. Двигатель запустится.

Задача 2.

Проверить устойчивость работы электродвигателя М2 с номинальной нагрузкой на валу при пуске соседнего двигателя М1 по условию задачи 1.

Характеристики двигателя М2 4А90Л4У3:

Номинальная мощность $P_{\text{н}} = 2,2$ кВт ,

Номинальное скольжение $s_{\text{н}} = 5,4$ % ,

Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,83$,

Номинальный КПД $\eta_{\text{н}} = 80$ % ,

Кратность пускового момента $\mu_n = 2$,
 Кратность критического момента $\mu_k = 2,2$,
 Кратность минимального момента $\mu_{min} = 1,6$,
 Кратность пускового тока $K_i = 6$.

Решение:

При определении устойчивости работы двигателя М2 при пуске двигателя М1, пренебрегаем относительно малым рабочим током двигателя М2 по сравнению с пусковым током двигателя М1. Поэтому используем найденное в предыдущей задаче падение напряжения.

Максимально допустимое снижение напряжения для устойчивой работы

$$\Delta U_{доп} = 1 - \sqrt{\frac{M_c^0}{\mu_k}}$$

где M_c^0 - относительный момент сопротивления на валу двигателя, т.к. он работает с номинальной нагрузкой $M_c^0 = 1$,
 μ_k – кратность критического момента.

$$\Delta U_{доп} = 1 - \sqrt{\frac{1}{2,2}} = 0,28.$$

Падение напряжения в линии $\Delta U = 0,214$ меньше найденного максимально допустимого, поэтому двигатель М2 будет устойчиво работать при пуске двигателя М1.

5.2 Контрольные задания

Задача 1.

Проверить электродвигатель на возможность пуска при питании от трансформатора через линию электропередач. Параметры двигателя указаны в таблице 5.1, в таблице 5.2 – параметры линии и трансформатора.

Таблица 5.1

Вариант	Двигатель	Параметры линии		Параметры трансформатора		
		l , км	R_n , Ом/км	X_n , Ом/км	S_n , кВА	u_k , %
1	2	3	4	5	6	7
1	АИР100L2	0,3	0,58	0,34	160	4,5
2	АИР112М2	0,4	0,64	0,45	160	4,7

Вариант	Двигатель	Параметры линии		Параметры трансформатора		
		l , км	R_n , Ом/км	X_n , Ом/км	S_n , кВА	u_k , %
1	2	3	4	5	6	7
3	АИР132М2	0,5	0,3	0,35	160	5,0
4	АИР 160S2	0,6	1,4	0,4	100	5,5
5	АИР100L4	0,7	0,58	0,34	160	4,5
6	АИР112М4	0,8	0,64	0,45	160	4,7
7	АИР132S4	0,9	0,3	0,35	160	5,0
8	АИР32М4	1	1,4	0,4	100	5,5
9	АИР132S6	0,5	0,58	0,34	160	4,5
10	АИР132М6	0,6	0,64	0,45	160	4,7
11	АНР160S6	0,7	0,3	0,35	160	5,0
12	АИР160М6	0,8	1,4	0,4	100	5,5

Таблица 5.2

№	Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , мин ⁻¹	Ток статора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos\varphi_n$	$I_{\text{пуск}}$	$M_{\text{пуск}}$	$M_{\text{макс}}$
							$I_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	АИР100L2	5,5	2850	10,7	88,0	0,89	7,5	2,1	2,4
2	АИР112М2	7,5	2895	14,7	88,0	0,88	7,5	2,0	2,2
3	АИР132М2	11,0	2910	21,1	88,0	0,90	7,5	1,6	2,2
4	АИР 160S2	15,0	2910	28,5	90,0	0,89	7,0	1,8	2,7
5	АИР100L4	4,0	1410	8,52	85,0	0,84	6,0	2,1	2,4
6	АИР112М4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5
7	АИР132S4	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5
8	АИР32М4	11,0	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1
9	АИР132S6	5,5	960	12,3	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2
10	АИР132М6	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2
11	АНР160S6	11,0	970	22,9	88,0	0,83	6,5	2,0	2,7
12	АИР160М6	15,0	970	30,5	88,0	0,85	6,5	2,0	2,7

Литература

1. Воробьев В.А. Электропривод сельскохозяйственных машин: учеб. для вузов. М.: БИБКМ, 2016. 304 с.
2. Епифанов А.П. Основы электропривода: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2017. 192 с.
3. Епифанов А.П. Электропривод: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2016. 400 с.
4. Епифанов А.П. Электропривод в сельском хозяйстве: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2016. 224 с.
5. Фролов Ю.М., Шемякин В.П. Проектирование электропривода промышленных механизмов: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2014. 448 с.
6. Епифанов А.П., Гущинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве: учеб. пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 224 с.
7. Фролов Ю.М., Шемякин В.П. Регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2018. 464 с.
8. Муконин А.К., Романов А.В., Трубецкой В.А. Электрический привод: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. 87 с.
9. Кузнецов А.Ю. Электрический привод и электрооборудование в АПК: практикум. Новосибирск: Новосибирский ГАУ, 2016. 73 с.

Основные технические данные электродвигателей серии АИ
основного исполнения

Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , мин ⁻¹	Ток статора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos\varphi_n$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Параметры схемы замещения, о.е		Момент инерции ротора, кг·м ²
									R_1^I	R_2^{II}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Синхронная частота вращения 3000 мин ⁻¹											
АИР50А2	0,09	2655	0,30	60,0	0,75	4,5	2,2	2,2	0,, 15	0,14	0,000025
АИР50В2	0,12	2655	0,39	63,0	0,75	5,0	2,2	2,2	0,11	0,12	0,000028
АИР56А2	0,18	2730	0,52	68,0	0,78	5,0	2,2	2,2	0,17	0,094	0,00042
АИР56В2	0,25	2730	0,70	69,0	0,79	5,0	2,2	2,2	0,16	0,11	0,00047
АИР63А2	0,37	2730	0,91	72,0	0,86	5,0	2,2	2,2	0,14	0,096	0,00075
АИР63В2	0,55	2730	1,31	75,0	0,85	5,0	2,2	2,2	0,13	0,096	0,00095
АИР71А2	0,75	2820	1,75	79,0	0,80	6,0	2,6	2,7	0,12	0,064	0,00095
АИР71В2	1,1	2805	2,55	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	0,13	0,069	0,0011
АИР80А2	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,2	2,6	0,084	0,049	0,0018
АИР80В2	2,2	2850	4,6	83,0	0,87	6,4	2,1	2,6	0,076	0,049	0,0021
АИР 90L2	3,0	2850	6,1	84,5	0,88	7,0	2,0	2,2	0,072	0,047	0,0035
АИР100S2	4,0	2850	7,9	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4	0,054	0,036	0,0055
АИР100Ь2	5,5	2850	10,7	88,0	0,89	7,5	2,1	2,4	0,050	0,036	0,0070
АИР112M2	7,5	2895	14,7	88,0	0,88	7,5	2,0	2,2	0,046	0,048	0,010
АИР132M2	11,0	2910	21,1	88,0	0,90	7,5	1,6	2,2	0,040	0,025	0,023
АИР 160S2	15,0	2910	28,5	90,0	0,89	7,0	1,8	2,7	0,052	0,022	0,043
АИР160M2	18,5	2910	34,5	90,5	0,90	7,0	2,0	2,7	0,019	0,022	0,048
АИР 180S2	22,0	2920	41,5	90,5	0,89	7,0	2,0	2,7	0,030	0,020	0,063
АИР 180M2	30,0	2925	55,4	91,5	0,90	7,5	2,2	3,0	0,030	0,018	0,076
АИР200M2	37,0	2940	71,0	91,0	0,87	7,0	1,6	2,8	0,029	0,021	0,12
АНР200L2	45,0	2940	84,5	92,0	0,88	7,5	1,8	2,8	0,027	0,020	0,13
АИР225M2	55,0	2940	99,3	92,5	0,91	7,5	1,8	2,6	0,026	0,019	0,20
АНР250S2	75,0	2940	134,6	93,0	0,91	7,5	1,8	3,0	0,021	0,015	0,47
АИР250M2	90,0	2940	160,0	93,0	0,92	7,5	1,8	3,0	0,016	0,016	0,52

Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , мин ⁻¹	Ток статора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos\phi_n$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$	Параметры схемы заме- щения, о.е		Момент инерции ротора, кг · м ²
									R_1^I	R_2^{II}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Синхронная частота вращения 1500 мин ⁻¹											
АИР50А4	0,06	1335	0,27	53,0	0,63	4,5	2,3	2,2	0,16	0,22	0,000032
АИР50В4	0,09	1335	0,37	57,0	0,65	4,5	2,3	2,2	0,13	0,21	0,000038
АИР56А4	0,12	1350	0,44	63,0	0,66	5,0	2,3	2,2	0,18	0,15	0,00070
АИР56В4	0,18	1350	0,63	64,0	0,68	5,0	2,3	2,2	0,18	0,16	0,00081
АИР63А4	0,25	1320	0,83	68,0	0,67	5,0	2,3	2,2	0,15	0,14	0,0012
АИР63В4	0,37	1320	1,18	68,0	0,70	5,0	2,3	2,2	0,17	0,14	0,0015
АИР71А4	0,55	1350	1,61	75,0	0,73	5,0	2,3	2,4	0,13	0,11	0,0013
АИР71В4	0,75	1350	1,90	75,0	0,80	5,0	2,5	2,6	0,11	0,11	0,0015
АИР80А4	и	1395	2,75	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4	0,12	0,068	0,0034
АИР80В4	1,5	1395	3,52	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	0,12	0,061	0,0035
АИР 90L4	2,2	1395	4,98	81,0	0,81	6,5	2,2	2,4	0,098	0,060	0,0056
АИР100S4	3,0	1410	6,70	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	0,078	0,053	0,0085
АИР100L4	4,0	1410	8,52	85,0	0,84	6,0	2,1	2,4	0,067	0,053	0,011
АИР112М4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5	0,054	0,041	0,016
АИР132S4	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	0,048	0,033	0,027
АИР32М4	11,0	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1	0,043	0,042	0,048
АИР160S4	15,0	1455	28,5	90,0	0,89	7,0	1,9	2,9	0,047	0,025	0,080
АИР160М4	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0	1,9	2,9	0,012	0,024	0,10
АИР180S4	22,0	1465	42,5	90,5	0,87	7,0	1,7	2,7	0,041	0,021	0,16
АИР180М4	30,0	1470	57,0	92,0	0,87	7,0	1,7	2,7	0,034	0,018	0,20
АИР200М4	37,0	1470	68,3	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,039	0,018	0,27
АНР200L4	45,0	1470	83,1	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,034	0,017	0,32
АИР225М4	55,0	1470	101	93,0	0,89	7,0	1,7	2,6	0,027	0,015	0,50
АМР250S4	75,0	1480	137,8	94,0	0,88	7,5	1,7	2,5	0,025	0,014	1,0
АИР250М4	90,0	1480	163,0	94,0	0,89	7,5	1,5	2,5	0,024	0,014	1,2
АИР280S4	110	1470	196	94,0	0,91	6,5	1,6	2,2	0,023	0,019	2,1
АИР280М4	132	1470	230	94,5	0,93	6,5	1,6	2,4	0,021	0,018	2,4
АИР315S4	160	1470	286	94,5	0,91	5,5	1,4	2,0	0,018	0,017	3,0
АИР315М4	200	1470	352	95,0	0,92	5,5	1,6	2,2	0,014	0,014	3,5
АИР355S4	250	1470	437	94,5	0,92	7,0	1,5	2,3	0,013	0,013	6,0
АИР355М4	315	1470	544	94,7	0,93	7,0	1,6	3,0	0,012	0,014	7,0

Тип электродвигателя	Мощность P_n , кВт	Частота вращения n_n , мин ⁻¹	Ток ста- тора I_n , А	КПД η_n , %	$\cos\varphi_n$	$I_{пуск}$ $I_{ном}$	$M_{пуск}$ $M_{ном}$	$M_{макс}$ $M_{ном}$	Параметры схемы заме- щения, о.е		Момент инерции ротора, кг · м ²
									R_1^I	R_2^{II}	
									10	11	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Синхронная частота вращения 1000 мин ⁻¹											
АИР63А6	0,18	860	0,79	56,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,24	0,22	0,0019
АИР63В6	0,25	860	1,04	59,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,18	0,21	0,0023
АИР71А6	0,37	915	1,31	66,0	0,63	4,5	2,1	2,3	0,17	0,15	0,0019
АИР71В6	0,55	915	1,74	69,0	0,68	4,5	1,9	2,2	0,16	0,15	0,0022
АИР80А6	0,75	920	2,26	71,0	0,71	4,0	2,1	2,2	0,16	0,12	0,0033
АИР80В6	1,1	920	3,05	75,0	0,74	4,5	2,2	2,3	0,12	0,11	0,0048
АИР90L6	1,5	925	4,16	76,0	0,72	6,0	2,0	2,2	0,11	0,088	0,0073
АИР100L6	2,2	945	5,58	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	0,09	0,067	0,013
АИР112МА6	3,0	950	7,4	81,5	0,76	6,0	2,0	2,2	0,085	0,063	0,017
АИР112МВ6	4,0	950	9,1	82,5	0,81	6,0	2,0	2,2	0,077	0,062	0,021
АИР132S6	5,5	960	12,3	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2	0,067	0,041	0,038
АИР132М6	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2	0,060	0,040	0,055
АНРИ60S6	11,0	970	22,9	88,0	0,83	6,5	2,0	2,7	0,073	0,030	0,12
АИР160М6	15,0	970	30,5	88,0	0,85	6,5	2,0	2,7	0,062	0,028	0,15
АИР180М6	18,5	980	36,9	89,5	0,85	6,5	1,8	2,4	0,056	0,026	0,24
АИР200М6	22,0	980	44,8	90,0	0,83	6,5	1,6	2,4	0,050	0,024	0,41
АИР200L6	30,0	975	59,6	90,0	0,85	6,5	1,6	2,4	0,046	0,022	0,46
АИР225М6	37,0	980	72,7	91,0	0,85	6,5	1,5	2,3	0,042	0,019	0,64
АИР250S6	45,0	980	87,0	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	0,037	0,015	1,1
АИР250М6	55,0	980	105	92,59	0,86	6,5	1,5	2,3	0,034	0,014	1,2
АИР280S6	75,0	980	137	93,0	0,90	6,5	1,3	2,2	0,032	0,021	2,8
АИР280М6	90,0	980	164	93,5	0,90	6,5	1,4	2,4	0,030	0,019	3,3
АИР315S6	ПО	980	200	93,5	0,90	6,0	1,4	2,3	0,026	0,018	4,0
АИР315М6	132	980	239	94,0	0,90	6,5	1,4	2,3	0,023	0,018	4,5
АИР355S6	160	980	288	94,0	0,90	6,5	1,7	2,3	0,020	0,015	7,3
АИР355М6	200	980	358	94,5	0,90	6,5	1,7	2,0	0,018	0,014	8,8

Учебное издание

Безик Валерий Александрович

Электрический привод

Учебно-методическое пособие
по выполнению практических работ

Редактор Лебедева Е.М.

Подписано к печати 31.01.2024 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. 3,95. Тираж 25 экз. Изд. № 7619.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ