

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, Н. А. Равинский**

**ЭЛЕКТРОПРИВОД.  
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение  
сельского хозяйства»*

Минск  
БГАТУ  
2025

УДК 62-83(07)  
ББК 31.28я7  
П75

**Рецензенты:**

кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники  
УО «Белорусский государственный технологический университет»  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Д. С. Карнович*);  
кандидат технических наук, доцент,  
заместитель директора по научной работе и проектированию  
РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

**Прищепов, М. А.**

П75      Электропривод. Практикум : учебно-методическое пособие /  
М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, Н. А. Равинский. – Минск :  
БГАТУ, 2025. – 112 с.  
ISBN 978-985-25-0317-4.

Приведены методики расчета механических и электромеханических характеристик нерегулируемых и регулируемых электроприводов, расчета продолжительности пуска электропривода аналитическим и графоаналитическим методами, выбора электродвигателей по мощности для основных режимов работы, а также методики выбора электродвигателей для электроприводов сельскохозяйственных машин и механизмов.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства», профилизация «Электроснабжение и электрооборудование; системы теплоснабжения».

УДК 62-83(07)  
ББК 31.28я7

ISBN 978-985-25-0317-4

© БГАТУ, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1	
Построение графиков механических характеристик рабочих машин .....	4
Практическое занятие № 2	
Расчет и построение графиков механической и электромеханической характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя (АД) .....	12
Практическое занятие № 3	
Графоаналитический метод расчета времени пуска асинхронного электропривода .....	28
Практическое занятие № 4	
Расчет и построение графиков механических характеристик асинхронного электродвигателя при регулировании скорости вращения частотой тока .....	35
Практическое занятие № 5	
Выбор электродвигателя по мощности для работы в режиме $S1$ .....	41
Практическое занятие № 6	
Выбор электродвигателя по мощности для работы в режиме $S2$ .....	49
Практическое занятие № 7	
Выбор асинхронного электродвигателя для привода горизонтального скребкового навозоуборочного транспортера кругового движения .....	58
Практическое занятие № 8	
Энергосбережение при регулировании подачи центробежных машин путем изменения скорости электропривода .....	73
Практическое занятие № 9	
Выбор электродвигателя по мощности для работы в режиме $S3$ .....	90
Практическое занятие № 10	
Выбор асинхронного электродвигателя режима $S1$ для работы в режиме $S3$ .....	96
Практическое занятие № 11	
Нагрев и охлаждение электродвигателя в режимах работы $S1, S2, S3$ .....	102
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	111

## Практическое занятие № 1

### ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ МАШИН

**Цель занятия:** научиться рассчитывать мощность, необходимую для привода вентилятора, по его основным техническим характеристикам, строить графики механических характеристик вентилятора.

#### Задача занятия

Определить мощность приводного электродвигателя и построить механические характеристики центробежного вентилятора, связанного с валом электродвигателя через ременную передачу (рис.).

#### Вопросы для самоподготовки

1. Какие существуют типовые механические характеристики общепромышленных механизмов?
2. Какие исходные данные необходимы для вычисления мощности вентилятора?

#### План занятия

1. Выписать из табл. 1.1 технические характеристики центробежного вентилятора согласно варианту.
2. Определить мощность, необходимую для обеспечения работы вентилятора в номинальном режиме.
3. Определить мощность электродвигателя вентилятора с учетом коэффициента запаса. Коэффициент запаса приведен в табл. 1.2.
4. Выбрать двигатель по табл. 1.3 и выписать его характеристики.
5. Определить номинальный статический момент сопротивления вентилятора (при угловой скорости рабочего колеса, заданной в табл. 1.1).
6. Выполнить расчеты механической характеристики вентилятора и построить ее график.

Таблица 1.1

## Исходные данные к задаче

Вариант	Номер вентилятора	Поддача $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Давление $p$ , Па	КПД вентилятора $\eta_1$ , о. е.	Угловая скорость колеса $\omega_{сн}$ , с <sup>-1</sup>	КПД передачи $\eta_2$ , о. е.
1	3	1600	600	0,760	200	0,95
2	3	1700	700	0,760	220	0,95
3	3	1800	800	0,770	240	0,95
4	3	1900	900	0,780	260	0,95
5	3	2000	1260	0,780	270	0,95
6	4	2000	360	0,750	120	0,95
7	4	2800	420	0,800	130	0,95
8	4	3000	680	0,780	170	0,95
9	4	4000	800	0,800	180	0,95
10	4	5000	850	0,760	200	0,95
11	5	6500	920	0,800	160	0,95
12	5	5600	750	0,800	180	0,95
13	5	5000	520	0,800	120	0,95
14	5	4000	500	0,760	110	0,95
15	6	4000	360	0,780	100	0,95
16	6	6000	340	0,780	80	0,95
17	6	7000	380	0,760	90	0,95
18	6	8000	650	0,800	110	0,95
19	6	9000	750	0,770	120	0,95
20	8	10 000	900	0,790	130	0,95
21	8	10 000	600	0,800	90	0,95
22	8	12 000	700	0,770	100	0,95
23	8	15 000	800	0,760	110	0,95
24	8	18 000	700	0,700	120	0,95
25	8	10 000	1200	0,560	100	0,95
26	8	13 000	1800	0,565	120	0,95
27	8	15 000	2700	0,560	130	0,95
28	8	17 000	3200	0,560	170	0,95
29	8	20 000	2200	0,560	180	0,95
30	8	10 000	1100	0,550	90	0,95

7. Определить приведенные к валу электродвигателя моменты сопротивления вентилятора.

8. Построить график приведенной к валу электродвигателя механической характеристики вентилятора.

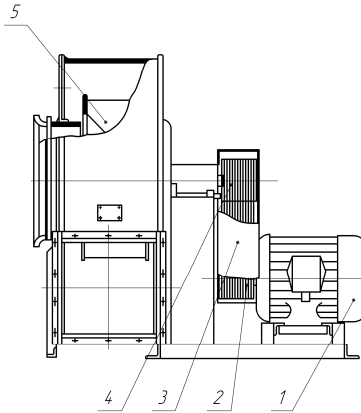


Рис. Конструкция центробежного вентилятора исполнения № 6:  
1 – электродвигатель; 2 – ведущий шкив; 3 – ременная передача;  
4 – ведомый шкив; 5 – колесо вентилятора

### Методические указания

#### К пункту 2 плана занятия

Мощность, необходимая для вращения вентилятора, вычисляется по формуле

$$P_{\text{мо}} = \frac{Qp}{\eta_1 \eta_2}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – объемная подача, м<sup>3</sup>/с;

$p$  – давление, Па;

$\eta_1$  – КПД вентилятора;

$\eta_2$  – КПД передачи (клиноременной – 0,95).

#### К пункту 3 плана занятия

Мощность вентилятора уточняют с помощью коэффициента запаса по мощности, который находят по табл. 1.2:

$$P_{\text{м}} = k_3 P_{\text{мо}}. \quad (1.2)$$

Таблица 1.2

Зависимость коэффициента запаса от мощности  $P_{\text{мо}}$ 

Мощность $P_{\text{мо}}$ , кВт	Коэффициент запаса
$P_{\text{мо}} \leq 0,5$	1,5
$0,5 < P_{\text{мо}} \leq 1,0$	1,3
$1,0 < P_{\text{мо}} \leq 2,0$	1,2
$2,0 < P_{\text{мо}} \leq 3,0$	1,1
$P_{\text{мо}} > 3,0$	1,0

**К пункту 4 плана занятия**

Двигатель выбирают в табл. 1.3 по значению фактически потребляемой мощности  $P_{\text{н}} \geq P_{\text{м}}$ . По форме табл. 1.3 выписывают все приведенные в ней технические характеристики двигателя.

**К пункту 5 плана занятия**

Номинальный статический момент сопротивления  $M_{\text{сн}}$  на приводном валу вентилятора вычисляется по формуле

$$M_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{м}}}{\omega_{\text{сн}}}, \quad (1.3)$$

где  $P_{\text{м}}$  – уточненная мощность вентилятора, найденная по формуле (1.2), Вт;

$\omega_{\text{сн}}$  – номинальная угловая скорость приводного вала вентилятора, рад/с.

**К пункту 6 плана занятия**

Механическая характеристика вентилятора описывается формулой

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с0}} + (M_{\text{сн}} - M_{\text{с0}}) \left( \frac{\omega_{\text{с}}}{\omega_{\text{сн}}} \right)^2, \quad (1.4)$$

где  $M_{\text{с}}$  – момент сопротивления при заданной скорости  $\omega_{\text{с}}$ , Н·м;

$M_{\text{с0}}$  – начальный статический момент, Н·м;

$M_{\text{сн}}$  – номинальный статический момент, Н·м.

Таблица 1.3

Технические данные электродвигателей серии АИР основного исполнения  
до 90 кВт при синхронной частоте вращения 1500 мин<sup>-1</sup>

Типоразмер электро- двигателя	Номи- нальная мощность $P_n$ , кВт	Номинальные значения			Кратности моментов, о. е.			Кратность пускового тока $k_i$ , о. е.	Момент инерции ротора $J_{р. д.}$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса двигателя $m$ , кг
		КПД $\eta$ , %	$\cos\phi_n$ , о. е.	сколь- жения $s_n$ , %	пуско- вого $\mu_{пуск}$	крити- ческого $\mu_{max}$	мини- мального при пуске $\mu_{min}$			
АИР50А4	0,06	53,0	0,63	11,0	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,60
АИР50В4	0,09	57,0	0,65	11,0	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,90
АИР56А4	0,12	63,0	0,66	10,0	2,3	2,2	1,8	5,0	0,000700	3,35
АИР56В4	0,18	64,0	0,68	10,0	2,3	2,2	1,8	5,0	0,000790	3,90
АИР63А4	0,25	68,0	0,67	12,0	2,3	2,2	1,8	5,0	0,001200	4,70
АИР63В4	0,37	68,0	0,70	12,0	2,3	2,2	1,8	5,0	0,001400	5,60
АИР71А4	0,55	70,5	0,70	9,5	2,3	2,2	1,8	5,0	0,001300	7,80
АИР71В4	0,75	73,0	0,76	10,0	2,2	2,2	1,6	5,0	0,001400	8,80
АИР80А4	1,10	75,0	0,81	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,003200	9,90
АИР80В4	1,50	78,0	0,83	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,003300	12,10
АИР90L4	2,20	81,0	0,83	7,0	2,1	2,2	1,6	6,5	0,005600	17,00
АИР100S4	3,00	82,0	0,83	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,008700	21,60
АИР100L4	4,00	85,0	0,84	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,011000	27,30
АИР112M4	5,50	85,5	0,86	4,5	2,0	2,5	1,6	7,0	0,017000	41,00
АИР132S4	7,50	87,5	0,86	4,0	2,0	2,5	1,6	7,5	0,028000	58,00
АИР132M4	11,00	87,5	0,87	3,5	2,0	2,7	1,6	7,5	0,040000	70,00
АИР160S4	15,00	90,0	0,89	3,0	1,9	2,9	1,8	7,0	0,078000	100,00

Окончание таблицы 1.3

Типоразмер электро- двигателя	Номи- нальная мощность $P_n$ , кВт	Номинальные значения			Кратности моментов, о. е.			Кратность пускового тока $k_i$ , о. е.	Момент инерции ротора $J_{р. д.}$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса двигателя $m$ , кг
		КПД $\eta$ , %	$\cos\varphi_n$ , о. е.	сколь- жения $s_n$ , %	пуско- вого $\mu_{пуск}$	крити- ческого $\mu_{max}$	мини- мального при пуске $\mu_{min}$			
АИР160М4	18,50	90,5	0,89	3,0	1,9	2,9	1,8	7,0	0,100000	110,00
АИР180S4	22,00	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7,0	0,150000	170,00
АИР180М4	30,00	92,0	0,87	2,0	1,7	2,7	1,5	7,0	0,190000	190,00
АИР200М4	37,00	92,5	0,89	2,0	1,7	2,7	1,6	7,5	0,280000	245,00
АИР200L4	45,00	92,5	0,89	2,0	1,7	2,7	1,6	7,5	0,340000	270,00
АИР225М4	55,00	93,0	0,89	2,0	1,7	2,6	1,6	7,0	0,510000	335,00
АИР250L4	75,00	94,0	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	0,890000	450,00
АИР250М4	90,00	94,0	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	1,100000	480,00

**К пункту 7 плана занятия**

Начальный статический момент принять  $M_{co} = 0,15M_{сн}$ .

Для нахождения  $M_c$  следует задать несколько значений угловой скорости  $\omega_c$  (табл. 1.4) и записать результаты вычислений моментов сопротивления  $M_c$  по формуле (1.4) по форме табл. 1.4.

Механическая характеристика рабочей машины представляется в виде зависимости  $M_c = f(\omega_c)$ .

Таблица 1.4

Результаты расчетов механической характеристики вентилятора

Механическая характеристика вентилятора						Приведенная механическая характеристика вентилятора		
$\omega_c$	$\frac{\omega_c}{\omega_{сн}}$	$\left(\frac{\omega_c}{\omega_{сн}}\right)^2$	$M_{сн}$	$M_{co}$	$(M_{сн} - M_{co})\left(\frac{\omega_c}{\omega_{сн}}\right)^2$	$M_c$ по формуле (1.4)	$M'_c$ по формуле (1.5)	$\omega'_{дв}$ по формуле (1.8)
	0							
	0,2							
	0,3							
	0,4							
	0,6							
	0,8							
	1,0							

**К пункту 8 плана занятия**

Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления вентилятора  $M'_c$  определяется по формуле

$$M'_c = \frac{M_c}{i\eta_2}, \quad (1.5)$$

где  $i$  – передаточное число:

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_{сн}}, \quad (1.6)$$

где  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость ротора электродвигателя, рад/с.

Если в каталоге задано номинальное скольжение  $s_n$ , то

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n), \quad (1.7)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость электромагнитного поля статора электродвигателя, рад/с:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30},$$

где  $n_0$  – синхронная частота вращения электромагнитного поля статора электродвигателя, об/мин (для двухполюсных электродвигателей  $n_0 = 3000$  об/мин; для четырехполюсных – 1500 об/мин; для шестиполюсных – 1000 об/мин).

Приведенная скорость двигателя определяется по формуле

$$\omega'_{дв} = \omega_c i. \quad (1.8)$$

Приведенная механическая характеристика вентилятора представляется в виде зависимости  $M'_c = f(\omega'_{дв})$  и строится на том же графике, что и характеристика  $M_c = f(\omega_c)$ . Расчеты рекомендуется записать по форме табл. 1.4.

### Контрольные задания

1. Поясните методику расчета мощности вентилятора.
2. Поясните методику построения механической характеристики вентилятора.
3. Поясните методику построения приведенной к валу электродвигателя механической характеристики рабочей машины.

## Практическое занятие № 2

### РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (АД)

**Цель занятия:** освоить методику расчета параметров схемы замещения АД по каталожным данным, методики расчета механических и электромеханических характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя и научиться строить их графики.

#### Основные теоретические сведения

Механические и электромеханические характеристики, как правило, получают из схем замещения АД. Наиболее часто используют Т-образную схему замещения АД, приведенную на рис. 2.1, которую в дальнейших расчетах преобразуют к Г-образной схеме замещения.

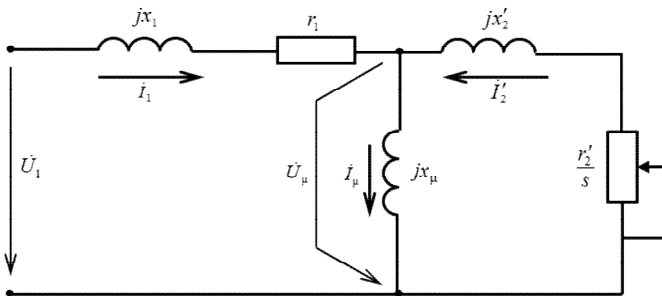


Рис. 2.1. Т-образная схема замещения АД:

$r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $r_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;  $x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;  $x_2'$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, Ом;  $x_\mu$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;  $I_1$  – фазный ток статора, А;  $I_2'$  – ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора, А;  $I_\mu$  – ток контура намагничивания, А;  $U_\mu$  – напряжение контура намагничивания, В;  $U_1$  – фазное напряжение питания обмоток статора, В

Однако вопрос определения параметров схемы замещения (СЗ) АД в настоящее время является актуальным, т. к. в справочной литературе и каталогах для двигателей новых серий как отечественного, так и зарубежного производства отсутствуют параметры СЗ, без которых невозможны расчет и построение их естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик.

От точности определения параметров СЗ АД зависят точность построения его характеристик и определение энергетических параметров как в двигательном, так и в генераторном режиме. Если ранее для серий двигателей А, АО, АО2, 4А параметры СЗ АД (проектные параметры) всегда приводились в каталожных данных заводов-изготовителей в абсолютных или относительных единицах, что не вызывало никаких затруднений при проведении расчетов через СЗ АД, то для современных серий АД (АИР, АИРМ, АДМ, 5А, 6А) параметры СЗ в каталожных и справочных данных отсутствуют, поэтому их расчет проводят через другие каталожные данные.

Все известные методики расчета параметров СЗ можно разделить на две группы: группа итерационных методик, требующая многократных уточняющих вычислений определенных параметров, и группа безытерационных методик, не требующая таких вычислений.

Наиболее точными методиками расчета параметров СЗ АД являются итерационные, т. к. принятые неизвестные параметры СЗ по мере расчета уточняются.

Схема алгоритма итерационной методики расчета параметров СЗ приведена на рис. 2.2.

После расчета параметров СЗ АД из Т-образной схемы (рис. 2.1) проводят расчет механической характеристики  $\omega = f(M)$ .

Тогда полное эквивалентное сопротивление схемы замещения АД относительно входных зажимов

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2' \underline{Z}_\mu}{\underline{Z}_2' + \underline{Z}_\mu}, \quad (2.1)$$

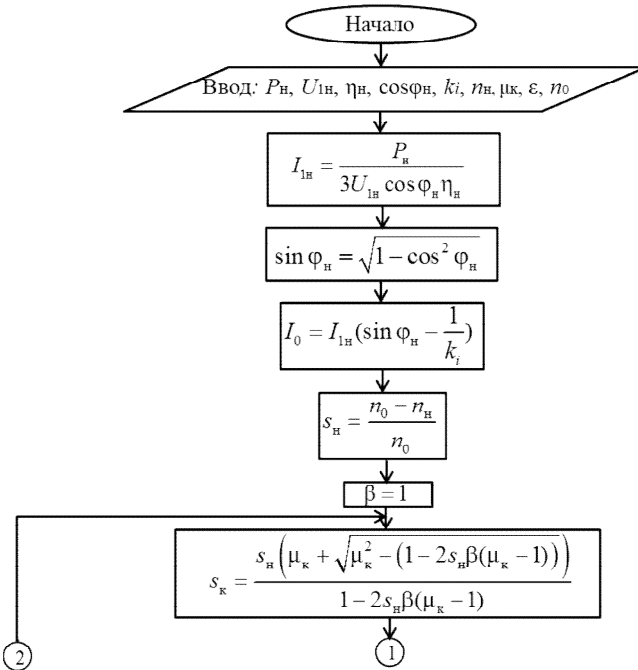
где  $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$  – полное сопротивление статора, Ом;

$\underline{Z}_2' = \frac{r_2'}{s} + jx_2'$  – полное приведенное сопротивление ротора, Ом;

$\underline{Z}_\mu = jx_\mu$  – полное сопротивление контура намагничивания, Ом.

Полное эквивалентное сопротивление схемы замещения АД в комплексном виде

$$\begin{aligned}
 \underline{Z} &= (r_1 + jx_1) + \frac{-x_2'x_\mu + jx_\mu \frac{r_2'}{s}}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + jx_\mu} = \\
 &= \frac{\left(r_1 \frac{r_2'}{s} - x_1x_2' - x_\mu(x_1 + x_2')\right) + j\left(r_1(x_2' + x_\mu) + \frac{r_2'}{s}(x_1 + x_\mu)\right)}{\frac{r_2'}{s} + j(x_2' + x_\mu)} = \\
 &= \frac{\left(r_1 \frac{r_2'}{s} - x_1x_2' - x_\mu x_\kappa\right) + j\left(r_1(x_2' + x_\mu) + \frac{r_2'}{s}(x_1 + x_\mu)\right)}{\frac{r_2'}{s} + j(x_2' + x_\mu)}.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$



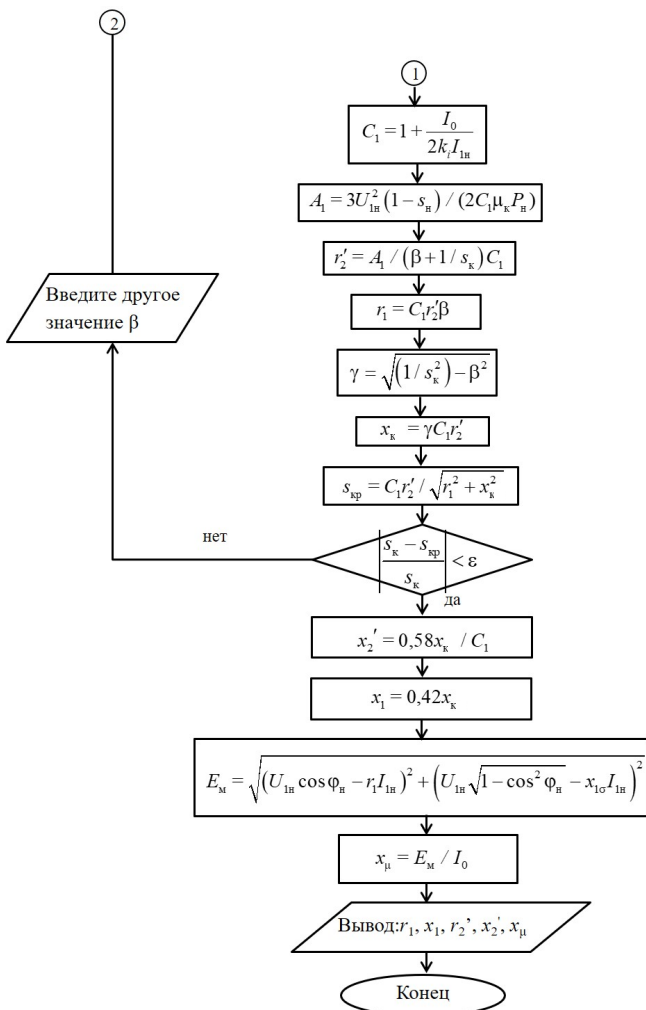


Рис. 2.2. Блок-схема алгоритма расчета параметров схемы замещения асинхронных двигателей:

$P_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $U_{1n}$  – номинальное напряжение питания (фазное), В;  $\eta_n$  – номинальный КПД АД, о. е.;  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности АД, о. е.;  $k_i$  – кратность пускового тока;  $s_{kp}$  – критическое скольжение, полученное через соотношение сопротивлений статора и ротора, о. е.;  $s_k$  – критическое скольжение, полученное из уточненной формулы Клосса при принятом  $\beta$  – отношении активного сопротивления обмотки статора  $r_1$  к активному сопротивлению обмотки ротора, приведенное к обмотке статора  $r_2'$ , начальное значение в алгоритме

принято равным единице;  $n_n$  – номинальная частота вращения, об/мин;  $n_0$  – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, об/мин;  $\varepsilon$  – относительная погрешность несовпадения вычисляемых критических скольжений АД (как правило – 0,010–0,025), о. е.;

$\mu_k$  – кратность максимального момента относительно номинального, о. е.;

$s_n$  – номинальное скольжение АД, о. е.;  $C_1$  – коэффициент приведения параметров Т-образной СЗ к Г-образной;  $A_1$  – промежуточная переменная, В<sup>2</sup>/Вт;  $\gamma$  – промежуточная переменная, о. е.;  $x_k$  – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе АД), Ом;  $x_1, x'_2$  – индуктивные сопротивления рассеяния фазы статора и ротора соответственно, Ом;  $E_m$  – ЭДС ветви намагничивания, В;  $x_\mu$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом

Далее из Т-образной схемы замещения выражают приведенный ток ротора в комплексном виде:

$$\dot{I}'_2 = \frac{U'_\mu}{Z'_2}, \quad (2.3)$$

где  $U'_\mu = U_1 - \frac{U_1}{Z_1} \cdot Z'_1$  – напряжение контура намагничивания, В.

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 &= \frac{U'_\mu}{Z'_2} = \frac{U_1 - \frac{U_1}{Z_1} \cdot Z'_1}{Z'_2} = U_1 \left( \frac{1}{Z'_2} - \frac{Z'_1}{Z_1 Z'_2} \right) = U_1 \left( \frac{Z_1 - Z'_1}{Z_1 Z'_2} \right) = U_1 \left( \frac{Z_2 Z'_\mu}{(Z_2 + Z'_\mu) Z'_2} \right) = \\ &= U_1 \left( \frac{jx_\mu \left( \frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + x_\mu) \right)}{\left( \left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + jx_\mu \right) \left( r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right) + j \left( r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right)} \right) = \\ &= \frac{U_1 jx_\mu}{\left( r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right) + j \left( r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right)}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Соответственно, действующее значение приведенного тока ротора

$$I'_2 = \frac{U_1 x_\mu}{\sqrt{\left( r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right)^2 + \left( r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right)^2}}. \quad (2.5)$$

Подставим полученное значение  $r_2'$  в мощность электрических потерь в роторе

$$\Delta P_{эл2} = 3r_2' r_2' \quad (2.6)$$

С некоторым допущением, пренебрегая потерями в стали ротора, выразим их как разность между электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = M\omega_0 \quad (2.7)$$

и механической мощностью

$$P_m = M\omega, \quad (2.8)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость АД, рад/с.

Тогда

$$\Delta P_{эл2} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s. \quad (2.9)$$

Тогда, учитывая полученные выражения и зная, что  $x_1/x_\mu \ll 1$  и  $x_2'/x_\mu \ll 1$ , следует выразить

$$\begin{aligned} M &= \frac{3U_1^2 x_\mu^2 r_2'}{\omega_0 s \left( \left( r_1 \frac{r_2'}{s} - x_1 x_2' - x_\mu x_k \right)^2 + \left( r_1 (x_2' + x_\mu) + \frac{r_2'}{s} (x_1 + x_\mu) \right)^2 \right)} = \\ &= 3U_1^2 x_\mu^2 r_2' \left( \omega_0 s \left( \left( r_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 - 2r_1 \frac{r_2'}{s} x_1 x_2' + (x_1 x_2')^2 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2r_1 \frac{r_2'}{s} x_\mu x_k + 2x_1 x_2' x_\mu x_k + x_\mu^2 x_k^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left( r_1^2 (x_2'^2 + 2x_2' x_\mu + x_\mu^2) + \left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 (x_1^2 + 2x_1 x_\mu + x_\mu^2) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2r_1 \frac{r_2'}{s} (x_2' x_1 + x_1 x_\mu + x_2' x_\mu + x_\mu^2) \right) \right)^{-1} = \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$= \frac{3U_1^2 r_2'}{\omega_0 s \left( x_k^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right)}.$$

Электромеханические характеристики  $\omega = f(I_1)$  АД рассчитываются по формуле, вытекающей из векторной диаграммы АД:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2}, \quad (2.11)$$

где  $I_1$  – действующее значение фазного тока обмоток статора АД, А;  
 $I_2'$  – приведенный к обмотке статора ток ротора, А:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2}}; \quad (2.12)$$

$I_0$  – ток холостого хода АД, А:

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}; \quad (2.13)$$

$\sin \varphi$  – синус угла между вектором фазного напряжения  $\bar{U}_1$  и со-  
 пряженным вектором тока ротора  $\bar{I}_2'$ :

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_k}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_k^2}}. \quad (2.14)$$

Значения угловых скоростей  $\omega$  при построении механических  $\omega = f(M)$  и электромеханических  $\omega = f(I)$  характеристик для различных скольжений  $s$  рассчитываются по формуле

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (2.15)$$

На основании проведенных расчетов для различных значений  $s$  строятся графики характеристик  $\omega = f(M)$  и  $\omega = f(I_1)$ .

**Пример.** Рассчитать параметры Т-образной СЗ АД типа АИР112МВ6УЗ:  $P_H = 4$  кВт;  $U_{1H} = 220$  В;  $n_0 = 1000$  об/мин;  $s_H = 0,051$  о. е.;  $\eta_H = 0,82$ ;  $\cos\varphi_H = 0,81$ ;  $k_i = I_n / I_{1H} = 6$  о. е.;  $\mu_n = M_n / M_H = 2$  о. е.;  $\mu_K = M_K / M_H = 2,2$  о. е.;  $\mu_{\min} = M_{\min} / M_H = 1,6$  о. е.

Расчет по алгоритму, приведенному на рис. 2.2:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3U_{1H} \cos\varphi_H \eta_H} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,12 \text{ А};$$

$$\sin\varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_H} = \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,59 \text{ о. е.};$$

$$I_0 = I_{1H} \left( \sin\varphi_H - \frac{1}{k_i} \right) = 9,12 \left( 0,59 - \frac{1}{6} \right) = 3,86 \text{ А};$$

$$\beta = 1;$$

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

$$= \frac{0,051 \left( 2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1))} \right)}{1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} =$$

$$= \frac{0,051(2,2 + 1,988)}{0,8878} = 0,24;$$

$$\frac{1}{s_K^2} = \frac{1}{0,24^2} > 1;$$

$$17,27 > 1;$$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2k_i I_{1H}} = 1 + \frac{3,86}{2 \cdot 6 \cdot 9,12} = 1,035;$$

$$A_1 = \frac{3U_{1H}^2 (1 - s_H)}{2C_1 \mu_K P_H} = \frac{3 \cdot 220 \cdot (1 - 0,051)}{2 \cdot 1,035 \cdot 2,2 \cdot 4000} = 7,564;$$

$$r_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) C_1} = \frac{7,564}{\left(1 + \frac{1}{0,24}\right) \cdot 1,035} = 1,414 \text{ Ом};$$

$$r_1 = C_1 r_2' \beta = 1,035 \cdot 1,414 \cdot 1 = 1,464 \text{ Ом};$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,24}\right)^2 - 1^2} = 4,04;$$

$$x_k = \gamma C_1 r_2' = 4,04 \cdot 1,035 \cdot 1,414 = 5,92 \text{ Ом};$$

$$s_{kp} = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{1,035 \cdot 1,414}{\sqrt{1,464^2 + 5,92^2}} = \frac{1,463}{\sqrt{2,143 + 35,05}} = \frac{1,463}{6,098} = 0,2399;$$

$$\left| \frac{s_k - s_{kp}}{s_k} \right| < \varepsilon;$$

$$\left| \frac{0,24 - 0,2399}{0,24} \right| \cdot 100 \% = 0,04 \% < 1 \% - 2,5 \%;$$

$$x_2' = \frac{0,58 x_k}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 5,92}{1,035} = 3,434 \text{ Ом};$$

$$x_1 = 0,42 x_k = 0,42 \cdot 5,92 = 2,486 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} E_M &= \sqrt{\left(U_{Ih} \cos \varphi_h - r_1 I_{Ih}\right)^2 + \left(U_{Ih} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_h} - x_1 I_{Ih}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(220 \cdot 0,81 - 1,75 \cdot 9,12\right)^2 + \left(220 \sqrt{1 - 0,81^2} - 2,486 \cdot 9,12\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(178,2 - 15,96\right)^2 + \left(220 \cdot 0,59 - 22,67\right)^2} = \\ &= \sqrt{26\,321,817 + 11\,476,837} = 194,42 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$x_{\mu} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{194,42}{3,86} = 50,37 \text{ Ом.}$$

Таблица 2.1

Параметры схемы замещения

Параметры	$r_1$	$x_1$	$r'_2$	$x'_2$	$x_{\mu}$
Расчет	1,464	2,486	1,414	3,434	50,37

### Задача занятия

По данным, приведенным в табл. 2.2, построить графики механической и электромеханической характеристик электродвигателя.

### Вопросы для самоподготовки

1. Какая характеристика называется механической характеристикой электродвигателя?
2. Какая характеристика называется электромеханической характеристикой электродвигателя?
3. Какие характерные точки различают на механической характеристике трехфазного асинхронного электродвигателя?
4. Какие существуют схемы замещения АД?
5. Какие характеристики АД называются естественными, а какие – искусственными?
6. В каком диапазоне угловых скоростей момент и ток статора АД пропорциональны?

### План занятия

1. Рассчитать параметры схемы замещения АД.
2. Рассчитать и построить механическую характеристику АД при номинальном напряжении.
3. Рассчитать и построить электромеханическую характеристику АД при номинальном напряжении.

## Методические указания

### К пункту 1 плана занятия

Исходные данные к расчету параметров схемы замещения АД, механической и электромеханической характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя выписать из табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные

Вариант	Выбранный двигатель	Номинальная мощность выбранного двигателя $P_{н}$ , кВт	Номинальная угловая скорость двигателя $\omega_{н}$ , рад/с	Кратности моментов, о. е.			Кратность пускового тока $k_f$	$\cos\varphi_{н}$	КПД номинальный $\eta_{н}$ , о. е.
				пускового $\mu_{п}$	критического $\mu_{к}$	минимального $\mu_{мин}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	АИР50В4	0,09	139,5	2,3	2,2	1,8	4,5	0,570	0,65
2	АИР56А4	0,12	141,1	2,3	2,2	1,8	5,0	0,630	0,66
3	АИР56В4	0,18	141,1	2,3	2,2	1,8	5,0	0,640	0,68
4	АИР63А4	0,25	137,9	2,3	2,2	1,8	5,0	0,680	0,67
5	АИР63В4	0,37	137,9	2,3	2,2	1,8	5,0	0,680	0,70
6	АИР71А4	0,55	141,9	2,3	2,2	1,8	5,0	0,705	0,70
7	АИР71В4	0,75	141,1	2,2	2,2	1,6	5,0	0,730	0,76
8	АИР80А4	1,10	145,8	2,2	2,2	1,6	5,5	0,750	0,81
9	АИР80В4	1,50	145,8	2,2	2,2	1,6	5,5	0,780	0,83
10	АИР90L4	2,20	145,8	2,1	2,2	1,6	6,5	0,810	0,83
11	АИР100S4	3,00	147,3	2,0	2,2	1,6	7,0	0,820	0,83
12	АИР100L4	4,00	147,3	2,0	2,2	1,6	7,0	0,850	0,84
13	АИР112M4	5,50	149,7	2,0	2,5	1,6	7,0	0,855	0,86
14	АИР132S4	7,50	150,5	2,0	2,5	1,6	7,5	0,875	0,86
15	АИР132M4	11,00	151,3	2,0	2,7	1,6	7,5	0,875	0,87
16	АИР50А2	0,09	277,4	2,2	2,2	1,8	4,5	0,600	0,75
17	АИР50В2	0,12	277,4	2,2	2,2	1,8	4,5	0,630	0,75
18	АИР56А2	0,18	285,3	2,2	2,2	1,8	5,0	0,680	0,78
19	АИР56В2	0,25	285,3	2,2	2,2	1,8	5,0	0,690	0,79
20	АИР63А2	0,37	285,3	2,2	2,2	1,8	5,0	0,720	0,86

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	АИР63В2	0,55	285,3	2,2	2,2	1,8	5,0	0,750	0,85
22	АИР71А2	0,75	294,7	2,1	2,2	1,6	6,0	0,785	0,83
23	АИР71В2	1,10	293,1	2,1	2,2	1,6	6,0	0,790	0,83
24	АИР80А2	1,50	297,8	2,1	2,2	1,6	7,0	0,810	0,85
25	АИР80В2	2,20	297,8	2,0	2,2	1,6	7,0	0,830	0,87
26	АИР90L2	3,00	297,8	2,0	2,2	1,6	7,0	0,845	0,88
27	АИР100S2	4,00	297,8	2,0	2,2	1,6	7,5	0,870	0,88
28	АИР100L2	5,50	297,8	2,0	2,2	1,6	7,5	0,880	0,89
29	АИР112М2	7,50	302,5	2,0	2,2	1,6	7,5	0,875	0,88
30	АИР132М2	11,00	304,1	1,6	2,2	1,2	7,5	0,880	0,90

Аналогично примеру рассчитать параметры Т-образной схемы замещения АД.

### К пункту 2 плана занятия

Механическая характеристика АД рассчитывается по приведенной ранее формуле

$$M = \frac{3U_1^2 r_2'}{\omega_0 s \left( x_k^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right)},$$

где  $x_k = x_1 + x_2'$  – индуктивное сопротивление обмоток АД для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом.

Критическое скольжение

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

Номинальное скольжение

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}.$$

Максимальный (критический) момент

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{н}}\mu_{\text{к}},$$

где  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент, Н·м;

$\mu_{\text{к}}$  – кратность максимального момента, о. е.

Номинальный момент

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}}\mu_{\text{п}}.$$

Минимальный момент (при наличии в паспорте АД  $\mu_{\text{мин}}$ )

$$M_{\text{мин}} = M_{\text{н}}\mu_{\text{мин}}.$$

При этом принимается  $\omega_{\text{мин}} = 0,15\omega_0$ .

Полученные значения расчетов сводятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты расчета механической характеристики АД

Расчетные величины	Значения расчетных величин при различном скольжении $s$						
	$s_{\text{н}}$	$3s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$	0,40	0,65	0,85	1,00
$M = \frac{3U_1^2 r_2'}{\omega_0 s \left( x_{\text{к}}^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_{\mu}} \right)^2 \right)}$							
$\omega = \omega_0(1 - s)$							

Далее по данным табл. 2.3 построить график механической характеристики АД  $\omega = f(M)$ .

**К пункту 3 плана занятия**

Электромеханическую характеристику  $\omega = f(I_1)$  рассчитывают по формулам, вытекающим из векторной диаграммы АД:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2};$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu}\right)^2}};$$

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_\mu)^2}};$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_1 + x_2'}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Полученные значения расчетов сводятся в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты расчета электромеханической характеристики АД

Расчетные величины	Значения расчетных величин при различном скольжении $s$						
	$s_H$	$3s_H$	$s_K$	0,40	0,65	0,85	1,00
$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu}\right)^2}}$							
$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_\mu)^2}}$							
$\sin \varphi_2 = \frac{x_1 + x_2'}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$							

Расчетные величины	Значения расчетных величин при различном скольжении $s$						
	$s_n$	$3s_n$	$s_k$	0,40	0,65	0,85	1,00
$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0I_2' \sin \varphi_2}$							
$\omega = \omega_0(1 - s)$							

Ток АД во время пуска можно определить по формуле

$$I_n = I_{1n} k_i.$$

При этом

$$I_{1n} = \frac{P_n}{3U_{1n} \cos \varphi_n \eta_n}.$$

Графики механической и электромеханической характеристик асинхронного трехфазного электродвигателя приведены на рис. 2.3.

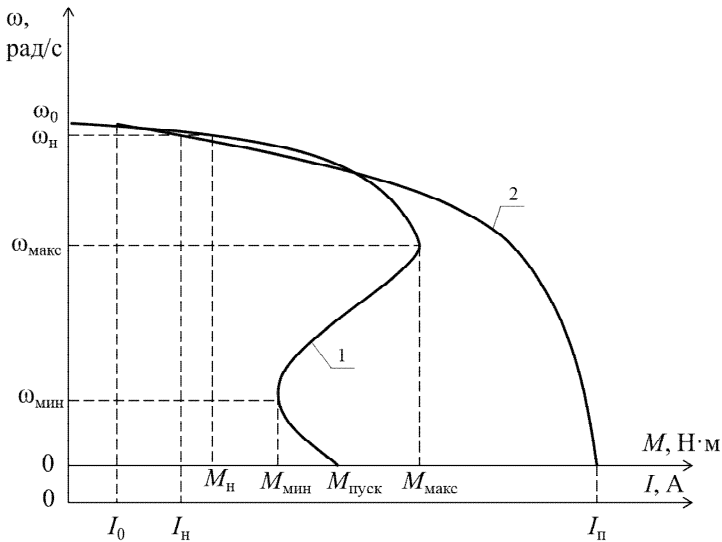


Рис. 2.3. Механическая (1) и электромеханическая (2) характеристики асинхронного трехфазного электродвигателя

## Контрольные вопросы и задания

1. На графике механической характеристики асинхронного электродвигателя укажите пять характерных точек.
2. Как зависит момент асинхронного электродвигателя от напряжения?
3. На графике электромеханической характеристики асинхронного электродвигателя укажите характерные точки.
4. В каком диапазоне скоростей момент АД пропорционален току обмоток статора?
5. Почему на нерабочей части механической характеристики АД момент не пропорционален току?
6. Почему расчетный ток  $I_n$  не совпадает с расчетным током  $I_1$  при скольжении  $s = 1$ ?

## Практическое занятие № 3

# ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Цель занятия:** освоить методику расчета продолжительности пуска электропривода и построить кривую изменения скорости электропривода при пуске.

### Задача занятия

Рассчитать продолжительность пуска электродвигателя аналитическим методом и сравнить ее со значением, полученным графоаналитическим методом.

### Вопросы для самоподготовки

1. Каково основное уравнение движения электропривода?
2. От каких параметров зависит время пуска электропривода?

### План занятия

1. Выписать технические данные электродвигателя из табл. 3.1 согласно варианту. Выписать исходные данные рабочей машины: приведенный момент сопротивления  $M'_{сн}$ , приведенный момент инерции  $J_{пр}$ .
2. Построить естественную механическую характеристику электродвигателя.
3. Построить на том же графике механическую характеристику рабочей машины, приведенную к валу двигателя.
4. Рассчитать продолжительность пуска электродвигателя по формуле (3.1).
5. Построить кривую изменения скорости электродвигателя при пуске.
6. По построенному графику определить время пуска.

## Методические указания

### К пункту 1 плана занятия

Выписать технические данные электродвигателя из табл. 3.1 согласно варианту.

Таблица 3.1

Исходные данные

Вариант	Электродвигатель						Рабочая машина	
	Тип двигателя	Номинальная мощность двигателя $P_{нр}$ , кВт	Номинальная угловая скорость двигателя $\omega_{нр}$ , рад/с	Кратность момента, о. е.			Приведенный момент сопротивления $M_{сш}$ , Н·м	Приведенный момент инерции $J_{пр}$ , кг·м <sup>2</sup>
				пускового $\mu_{пуск}$	критического $\mu_{кр}$	минимального $\mu_{мин}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	АИР50В4	0,09	139,5	2,3	2,2	1,8	0,52	0,0195
2	АИР56А4	0,12	141,1	2,3	2,2	1,8	0,68	0,0287
3	АИР56В4	0,18	141,1	2,3	2,2	1,8	1,02	0,0408
4	АИР63А4	0,25	137,9	2,3	2,2	1,8	1,45	0,0392
5	АИР63В4	0,37	137,9	2,3	2,2	1,8	2,15	0,0494
6	АИР71А4	0,55	141,9	2,3	2,2	1,8	3,10	0,0813
7	АИР71В4	0,75	141,1	2,2	2,2	1,6	4,25	0,1414
8	АИР80А4	1,10	145,8	2,2	2,2	1,6	6,04	0,1532
9	АИР80В4	1,50	145,8	2,2	2,2	1,6	8,23	0,2033
10	АИР90L4	2,20	145,8	2,1	2,2	1,6	12,07	0,2856
11	АИР100S4	3,00	147,3	2,0	2,2	1,6	16,29	0,3187
12	АИР100L4	4,00	147,3	2,0	2,2	1,6	21,72	0,4213
13	АИР112M4	5,50	149,7	2,0	2,5	1,6	29,39	0,6071
14	АИР132S4	7,50	150,5	2,0	2,5	1,6	39,87	0,6782
15	АИР132M4	11,00	151,3	2,0	2,7	1,6	58,16	0,9305
16	АИР50А2	0,09	277,4	2,2	2,2	1,8	0,26	0,0051
17	АИР50В2	0,12	277,4	2,2	2,2	1,8	0,35	0,0065
18	АИР56А2	0,18	285,3	2,2	2,2	1,8	0,50	0,0109
19	АИР56В2	0,25	285,3	2,2	2,2	1,8	0,70	0,0145
20	АИР63А2	0,37	285,3	2,2	2,2	1,8	1,04	0,0198

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	АИР63В2	0,55	285,3	2,2	2,2	1,8	1,54	0,0279
22	АИР71А2	0,75	294,7	2,1	2,2	1,6	2,04	0,0310
23	АИР71В2	1,10	293,1	2,1	2,2	1,6	3,00	0,0431
24	АИР80А2	1,50	297,8	2,1	2,2	1,6	4,03	0,0438
25	АИР80В2	2,20	297,8	2,0	2,2	1,6	5,91	0,0611
26	АИР90L2	3,00	297,8	2,0	2,2	1,6	8,06	0,0785
27	АИР100S2	4,00	297,8	2,0	2,2	1,6	10,75	0,0969
28	АИР100L2	5,50	297,8	2,0	2,2	1,6	14,78	0,1185
29	АИР112M2	7,50	302,5	2,0	2,2	1,6	19,83	0,0811
30	АИР132M2	11,00	304,1	1,6	2,2	1,2	28,94	0,0707

### К пункту 2 плана занятия

Построить естественную механическую характеристику электродвигателя по пяти характерным точкам.

Точка 1:

$$\begin{cases} M = 0; \\ \omega = \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = 0,1045n_0, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость электромагнитного поля статора, рад/с;

$n_0$  – синхронная частота вращения электромагнитного поля статора, об/мин; для двухполюсных двигателей  $n_0 = 3000$  об/мин, для четырехполюсных – 1500 об/мин.

Точка 2:

$$\begin{cases} M = M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \\ \omega = \omega_n, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт (табл. 3.1);

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость электродвигателя, рад/с (табл. 3.1).

Точка 3:

$$\begin{cases} M = M_k = M_n \mu_{кр}; \\ \omega = \omega_{кр} = \omega_0 (1 - s_{кр}), \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $M_k$  – критический момент электродвигателя, Н·м;

$\mu_{кр}$  – кратность критического момента, о. е. (табл. 3.1);

$\omega_{кр}$  – угловая скорость электродвигателя, соответствующая критическому моменту  $M_k$ , рад/с;

$s_{кр}$  – критическое скольжение электродвигателя, о. е.:

$$s_{кр} = \frac{s_n \left( \mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 + 2s_n (\mu_{кр} - 1) - 1} \right)}{1 - 2s_n (\mu_{кр} - 1)}, \quad (3.4)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение электродвигателя, о. е.,  $s_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0$ .

Точка 4:

$$\begin{cases} M = M_{мин} = M_n \mu_{мин}; \\ \omega = \omega_{мин} = 0,15\omega_0, \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $M_{мин}$  – минимальный момент электродвигателя, Н·м;

$\mu_{мин}$  – кратность минимального момента, о. е. (табл. 3.1);

$\omega_{мин}$  – угловая скорость электродвигателя, соответствующая минимальному моменту  $M_{мин}$ , рад/с.

Точка 5:

$$\begin{cases} M = M_n = M_n \mu_n; \\ \omega = 0, \end{cases} \quad (3.6)$$

где  $M_n$  – пусковой момент электродвигателя, Н·м;

$\mu_n$  – кратность пускового момента, о. е. (табл. 3.1).

Построение естественной механической характеристики электродвигателя выполнить по образцу (рис.).

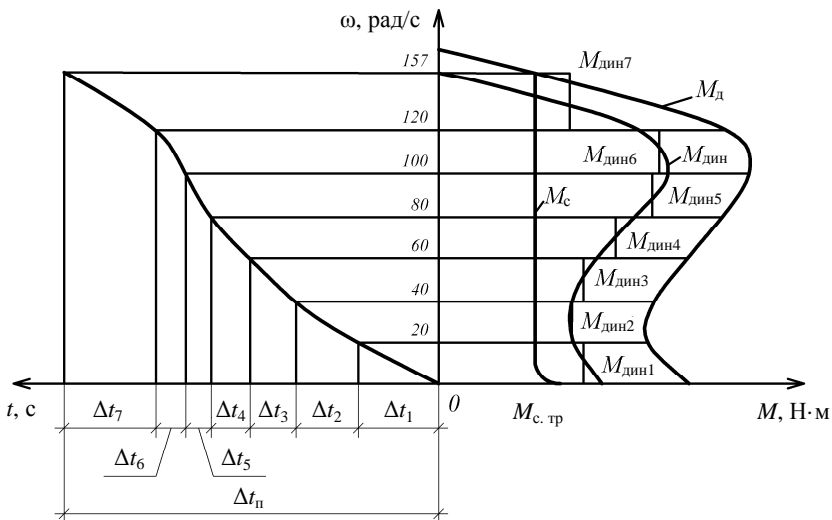


Рис. Построение кривой изменения скорости электродвигателя при пуске

### К пункту 3 плана занятия

Принять, что электродвигатель приводит в движение транспортер. Механическую характеристику транспортера построить по уравнению  $M'_{сн} = \text{const}$ . Значения  $M'_{сн}$  приводятся в табл. 3.1. Транспортер имеет приведенный момент трогания  $M'_{с.тр} = 1,3M'_{сн}$  (рис.).

### К пункту 4 плана занятия

Продолжительность пуска электродвигателя

$$t_{п} = \frac{J_{пр} \omega_{н}}{M_{э} - M'_{сн}}, \quad (3.7)$$

где  $J_{пр}$  – приведенный к валу электродвигателя момент инерции вращающихся частей электропривода, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega_{н}$  – номинальная угловая скорость электродвигателя, рад/с;

$M_{э}$  – эффективный момент электродвигателя, определяется по формуле (3.8), Н·м;

$M'_{сн}$  – приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления рабочей машины, Н·м.

Эффективный момент электродвигателя при пуске

$$M_{\text{э}} = \frac{M_{\text{к}} s_{\text{к}}}{0,25 + 1,5 s_{\text{к}}^2}, \quad (3.8)$$

где  $M_{\text{к}}$  – критический момент электродвигателя, Н·м;  
 $s_{\text{к}}$  – критическое скольжение ротора электродвигателя, о. е.

**К пункту 5 плана занятия**

Для построения кривой изменения скорости электропривода при пуске необходимо провести построения по образцу (рис.). Сначала в правой части графика построить в масштабе механическую характеристику электродвигателя. В том же масштабе построить механическую характеристику рабочей машины. Далее линию скорости разбивают на участки через  $\Delta\omega = 20$  рад/с и проводят горизонтальные линии. На каждом участке скорости находят значения  $M_{\text{дин}}$ , отнимая (в каждой точке скорости) от момента двигателя момент сопротивления рабочей машины. Затем строят кривую изменения избыточного момента. На каждом участке скорости принимают  $M_{\text{дин}} = \text{const}$ . Получена ломаная ступенчатая линия динамического момента (рис.).

Замерить и записать значения  $\Delta\omega_i$  и  $M_{\text{дин}i}$  по форме табл. 3.2 для каждого участка скорости.

Время изменения скорости на любом участке

$$\Delta t_i = \frac{J_{\text{пр}} \Delta\omega_i}{M_{\text{дин}i}}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta\omega_i$  – изменение скорости на участке  $i$ , рад/с;  
 $M_{\text{дин}i}$  – динамический момент на участке  $i$ , Н·м.

Таблица 3.2

Расчетные значения приращения скорости и динамического момента

Параметр	Участки						
	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta\omega$ , рад/с							
$M_{\text{дин}}$ , Н·м							
$\Delta t$ , с							

Например, на участке  $i = 1$

$$\Delta t_1 = \frac{J_{\text{пр}} \Delta \omega_1}{M_{\text{дин1}}}, \quad (3.10)$$

на участке  $i = 2$

$$\Delta t_2 = \frac{J_{\text{пр}} \Delta \omega_2}{M_{\text{дин2}}} \text{ и т. д.} \quad (3.11)$$

### ***К пункту 6 плана занятия***

Общее время пуска

$$t_{\text{п}} = \sum \Delta t_i. \quad (3.12)$$

Сравнить время, полученное аналитическим расчетом по формуле (3.7), и время, полученное графоаналитическим расчетом.

Графоаналитический расчет является более точным, если выполнить его аккуратно и разбить скорость на малые участки.

### **Контрольные вопросы**

1. По какой формуле определяется продолжительность пуска расчетом?
2. Как определяется динамический момент двигателя?
3. Какова методика выполнения графоаналитического расчета времени пуска?
4. От чего зависит точность расчета времени пуска АД в графоаналитическом методе?
5. Как именно уменьшить продолжительность пуска АД?
6. Как можно облегчить условия пуска АД?

## Практическое занятие № 4

### РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ТОКА

*Цель занятия:* научиться рассчитывать и строить графики механических характеристик асинхронного электродвигателя при частотном регулировании скорости вращения.

#### Задача занятия

Рассчитать механические характеристики и построить их графики при частотном регулировании скорости и управлении напряжением обмоток статора по соответствующему закону (преобразователь частоты будет использоваться для электропривода дозатора кормораздатчика и вентилятора).

#### Вопросы для самоподготовки

1. Почему при изменении частоты тока требуется изменять и напряжение питания асинхронного электродвигателя?
2. Какие преобразователи частоты используются в электроприводе?
3. Почему наибольшее распространение получили преобразователи частоты со звеном постоянного тока?
4. Из каких основных узлов состоят преобразователи частоты со звеном постоянного тока?

#### План занятия

1. Выписать из практического занятия № 2 технические данные асинхронного электродвигателя по своему варианту.
2. Определить для заданного электродвигателя номинальный момент  $M_{ном}$ , критический момент  $M_k$ , номинальную угловую скорость  $\omega_{ном}$ , критическое скольжение  $s_k$ , критическую угловую скорость  $\omega_k$ .
3. Рассчитать естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя.

4. Рассчитать искусственную механическую характеристику асинхронного электродвигателя при частоте  $f = 40$  Гц,  $f = 30$  Гц и  $f = 20$  Гц при законах изменения напряжения  $\frac{U}{f} = \text{const}$ ,  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ .

5. Построить на одном графике естественную и искусственные механические характеристики при законе изменения напряжения  $\frac{U}{f} = \text{const}$ , а на другом – естественную и искусственные механические характеристики при законе изменения напряжения  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ .

### Методические указания

#### ***К пункту 1 плана занятия***

Выписать технические данные асинхронного электродвигателя по своему варианту из табл. 2.1 (практическое занятие № 2).

Выписать рассчитанные по своему варианту в практическом занятии № 2 значения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя.

#### ***К пункту 2 плана занятия***

Моменты электродвигателя на естественной механической характеристике определить по следующим формулам:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}; \quad (4.1)$$

$$M_{\text{к}} = \mu_{\text{к}} M_{\text{н}}, \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

Номинальная угловая скорость двигателя, рад/с:

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0(1 - s_{\text{н}}). \quad (4.3)$$

Для двухполюсных электродвигателей  $\omega_0 = 314$  рад/с, для четырехполюсных  $\omega_0 = 157$  рад/с, для шестиполюсных  $\omega_0 = 104,5$  рад/с.

Критическое скольжение и критическая угловая скорость на естественной механической характеристике определяются по следующим формулам:

$$s_k = s_n \left( \mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right); \quad (4.4)$$

$$\omega_k = \omega_0(1 - s_k), \quad (4.5)$$

где  $s$  – скольжение, о. е.

### **К пункту 3 плана занятия**

Естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя при  $f_1 = 50$  Гц рассчитать по уравнению, полученному в практической работе № 2:

$$M = \frac{3U_{1н}^2 r_2'}{\omega_0 s \left[ (x_1 + x_2')^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right]}. \quad (4.6)$$

Для удобства записать расчеты по форме табл. 4.1.

### **К пункту 4 плана занятия**

Искусственную механическую характеристику при новой частоте  $f$  рассчитать по формуле

$$M = \frac{3U_{1ф}^2 r_2'}{\omega_0 \alpha s \left[ (x_1 + x_2')^2 \alpha^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{s x_\mu \alpha} \right)^2 \right]}, \quad (4.7)$$

где  $U_{1ф} = U_1 \alpha$  – при законе  $\frac{U}{f} = \text{const}$ , В;

$U_{1ф} = U_1 \alpha^2$  – при законе  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ , В;

$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}$  – относительная частота напряжения питания обмоток

статора АД, о. е.

Для удобства записать расчеты по форме табл. 4.2.

Таблица 4.1

Расчет естественной механической характеристики АД при  $f_{1н} = 50$  Гц

Расчетные величины	Значения расчетных величин при различном скольжении $s$						
	$s_n$	$3s_n$	$s_k$	0,40	0,65	0,85	1,00
$M = \frac{3U_{1н}^2 r_2'}{\omega_0 s \left[ (x_1 + x_2')^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{sx_\mu} \right)^2 \right]}$							
$\omega = \omega_0(1 - s)$							

Таблица 4.2

Исходные данные по варианту

Расчетные величины	Закон регулирования	Значения расчетных величин при различном скольжении $s$						
		$s_n$	$3s_n$	$s_k$	0,4	0,65	0,85	1,00
$M = \frac{3U_{1ф}^2 r_2'}{\omega_0 \alpha s \left[ (x_1 + x_2')^2 \alpha^2 + \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 r_2'}{sx_\mu \alpha} \right)^2 \right]}$	$\frac{U}{f} = \text{const}$							
	$\frac{U}{f^2} = \text{const}$							
$\omega = \omega_0 \alpha(1 - s)$								

**К пункту 5 плана занятия**

Построить механические характеристики при частотном регулировании скорости асинхронного электродвигателя для закона регулирования  $\frac{U}{f} = \text{const}$  на одном графике с естественной характеристикой.

Размеры графиков не менее 15×15 см. Примерный вид механических характеристик асинхронного электродвигателя при регулировании скорости частотой тока обмоток статора для закона регулирования  $\frac{U}{f} = \text{const}$  приведен на рис. 4.1, а для закона регулирования  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$  – на рис. 4.2.

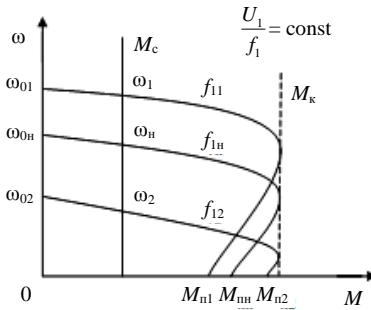


Рис. 4.1. Вид механических характеристик асинхронного электродвигателя при регулировании скорости вращения частотой тока при  $\frac{U}{f} = \text{const}$

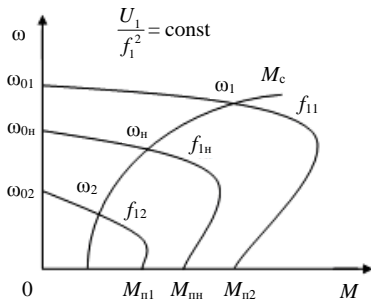


Рис. 4.2. Вид механических характеристик асинхронного электродвигателя при регулировании скорости вращения частотой тока при  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$

## Контрольные вопросы и задания

1. Каким уравнением описываются механические характеристики при частотном регулировании скорости?

2. Как изменяется синхронная скорость при регулировании частоты тока?

3. Постройте графики искусственных механических характеристик при управлении напряжением преобразователя частоты по закону

$$\frac{U}{f} = \text{const.}$$

4. Постройте графики искусственных механических характеристик при управлении напряжением преобразователя частоты по закону

$$\frac{U}{f^2} = \text{const.}$$

5. Какие законы управления в преобразователях частоты используются для конвейеров?

6. Какие законы управления в преобразователях частоты используются при вентиляторной нагрузке?

## Практическое занятие № 5

### ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ S1

*Цель занятия:* освоить методику выбора по мощности асинхронного электродвигателя для работы в режиме S1.

#### Общие сведения о режимах работы АД

По режиму работы двигателя выпускаются трех серий – продолжительного (S1), кратковременного (S2) и повторно-кратковременного (S3). В зависимости от того, из какой серии предполагается выбрать двигатель, производится преобразование реальной нагрузочной диаграммы к соответствующей стандартной, для работы при которой спроектирован двигатель. Желательно выбирать двигатель той серии, которая больше соответствует реальному режиму работы привода. Для продолжительного режима работы целесообразно выбрать двигатель серии S1. Если выбирать двигатель из серии S2 и S3, то их необходимо завышать по мощности, что приведет к уменьшению КПД и коэффициента мощности АД и, соответственно, к увеличению потерь.

#### Задача занятия

Для заданной нагрузочной диаграммы рабочей машины выбрать четырехполюсный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (рабочий вал машины связан с валом электродвигателя через ременную передачу).

#### Вопросы для самоподготовки

1. Чем характеризуется режим работы S1?
2. Какое время работы электродвигателя характерно для режима работы S1 (по сравнению с постоянной времени нагрева)?

## План занятия

1. Выписать исходные данные согласно варианту.
2. Построить нагрузочную диаграмму рабочей машины.
3. Определить среднюю мощность нагрузки, приведенную к валу электродвигателя.
4. Определить мощность электродвигателя по методу средних потерь.
5. Проверить выбранный электродвигатель по условиям пуска.
6. Проверить выбранный электродвигатель по условиям преодоления максимального приведенного момента сопротивления рабочей машины.

## Методические указания

### *К пункту 1 плана занятия*

Исходные данные согласно варианту из табл. 5.1 записать по форме табл. 5.2.

*Таблица 5.1*

Исходные данные

Вариант	Мощность, кВт, на валу рабочей машины по периодам						Продолжительность, мин, работы по периодам					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0,05	0,07	0,10	0,06	0,05	0,04	15	10	5	10	15	25
2	0,10	0,15	0,20	0,15	0,10	0,05	14	9	4	9	14	24
3	0,15	0,20	0,30	0,20	0,15	0,10	12	8	2	8	12	20
4	0,20	0,30	0,40	0,30	0,20	0,10	15	10	5	10	15	25
5	0,25	0,35	0,50	0,35	0,25	0,10	14	9	4	9	14	24
6	0,30	0,40	0,60	0,40	0,30	0,20	12	8	2	8	12	20
7	0,40	0,50	0,70	0,50	0,40	0,20	10	20	6	20	15	10
8	0,40	0,60	0,80	0,60	0,40	0,20	12	8	7	12	14	10
9	0,45	0,60	0,90	0,60	0,40	0,20	15	10	5	10	15	25
10	0,50	0,75	1,00	0,70	0,60	0,30	10	15	5	15	10	25
11	0,60	0,70	1,10	0,80	0,60	0,30	15	10	5	25	10	15
12	0,60	0,85	1,20	0,85	0,70	0,40	15	10	5	25	10	15
13	0,65	0,90	1,30	0,90	0,80	0,50	15	10	5	25	10	15
14	0,70	1,00	1,40	1,00	0,70	0,50	13	12	6	12	13	10
15	1,00	1,50	2,00	1,50	1,00	0,50	13	12	6	12	13	10

Вариант	Мощность, кВт, на валу рабочей машины по периодам						Продолжительность, мин, работы по периодам					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
16	1,50	2,00	3,00	2,00	1,50	1,00	13	12	6	12	13	10
17	2,00	3,00	4,00	3,00	2,00	1,00	10	20	4	20	10	5
18	2,50	4,50	5,00	3,50	3,00	1,00	10	20	4	20	5	10
19	3,00	5,00	6,00	4,00	3,00	2,00	20	10	4	5	20	10
20	3,50	5,50	7,00	6,00	5,50	3,00	15	10	5	10	15	10
21	4,00	6,00	8,00	6,00	4,00	3,00	15	10	5	10	15	10
22	5,00	7,50	10,00	8,00	5,00	3,00	10	15	5	15	10	5
23	7,50	11,00	15,00	12,00	7,00	3,00	10	15	5	15	5	10
24	10,00	15,00	20,00	15,00	10,00	5,00	10	20	5	20	10	5
25	12,50	18,00	25,00	18,00	15,00	5,00	10	20	4	20	10	5
26	15,00	20,00	30,00	20,00	15,00	10,00	10	15	4	20	20	5
27	15,00	25,00	35,00	25,00	15,00	10,00	10	15	4	15	10	5
28	20,00	30,00	40,00	30,00	20,00	10,00	10	10	10	10	10	10
29	25,00	35,00	45,00	35,00	25,00	15,00	10	10	8	10	10	10
30	25,00	40,00	50,00	45,00	30,00	15,00	15	15	4	15	15	15

Таблица 5.2

Исходные данные по варианту

Вариант	Мощность, кВт, на валу рабочей машины по периодам						Продолжительность, мин, работы по периодам					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6

**К пункту 2 плана занятия**

По данным табл. 5.2 построить нагрузочную диаграмму в масштабе по образцу (рис.).

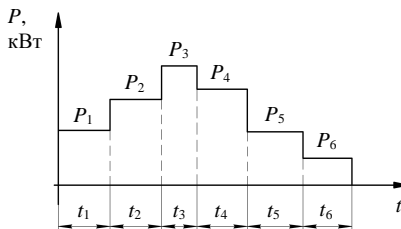


Рис. Пример нагрузочной диаграммы

### К пункту 3 плана занятия

Определить среднюю мощность нагрузочной диаграммы по формуле

$$P_{\text{cp}} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4 + P_5 t_5 + P_6 t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}. \quad (5.1)$$

Определить приведенную к валу электродвигателя среднюю мощность за цикл работы по формуле

$$P'_{\text{cp}} = \frac{P_{\text{cp}}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (5.2)$$

где  $\eta_{\text{пер}}$  – КПД ременной передачи; принять  $\eta_{\text{пер}} = 0,95$ .

### К пункту 4 плана занятия

Определить мощность электродвигателя по методу средних потерь, используя следующую методику. Из табл. 5.3 выбрать ближайший больший по мощности асинхронный электродвигатель по условию

$$P_{\text{н}} \geq P'_{\text{cp}}. \quad (5.3)$$

Таблица 5.3

Технические данные асинхронных электродвигателей

Типоразмер электродвигателя	$P_{\text{н}}$ , кВт	$\eta_{\text{н}}$ , %	$\cos\varphi$ , о. е.	$\mu_{\text{пуск}}$ , о. е.	$\mu_{\text{мин}}$ , о. е.	$\mu_{\text{к}}$ , о. е.	$s_{\text{н}}$ , %	$s_{\text{к}}$ , %
АИР50А4	0,06	53,0	0,63	2,3	1,8	2,2	11,0	63,2
АИР50В4	0,09	57,0	0,65	2,3	1,8	2,2	11,0	63,2
АИР56А4	0,12	63,0	0,66	2,3	1,8	2,2	10,0	55,5
АИР56В4	0,18	64,0	0,68	2,3	1,8	2,2	10,0	55,5
АИР63А4	0,25	68,0	0,67	2,3	1,8	2,2	12,0	71,3
АИР63В4	0,37	68,0	0,70	2,3	1,8	2,2	12,0	71,3
АИР71А4	0,55	70,5	0,70	2,3	1,8	2,2	9,5	51,9
АИР71В4	0,75	73,0	0,76	2,2	1,6	2,2	10,0	55,5
АИР80А4	1,10	75,0	0,81	2,2	1,6	2,2	7,0	35,4
АИР80В4	1,50	78,0	0,83	2,2	1,6	2,2	7,0	35,4
АИР90Л4	2,20	81,0	0,83	2,1	1,6	2,2	7,0	35,4
АИР100S4	3,00	82,0	0,83	2,0	1,6	2,2	6,0	29,4

Типоразмер электродвигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi$ , о. е.	$\mu_{\text{пуск}}$ , о. е.	$\mu_{\text{мин}}$ , о. е.	$\mu_k$ , о. е.	$s_n$ , %	$s_k$ , %
АИР100L4	4,00	85,0	0,84	2,0	1,6	2,2	6,0	29,4
АИР112М4	5,50	85,5	0,86	2,0	1,6	2,5	4,5	25,1
АИР132S4	7,50	87,5	0,86	2,0	1,6	2,5	4,0	21,9
АИР132М4	11,00	87,5	0,87	2,0	1,6	2,7	3,5	20,8
АИР160S4	15,00	90,0	0,89	1,9	1,8	2,9	3,0	19,1
АИР160М4	18,50	90,5	0,89	1,9	1,8	2,9	3,0	19,1
АИР180S4	22,00	90,5	0,87	1,7	1,5	2,4	2,5	12,4
АИР180М4	30,00	92,0	0,87	1,7	1,5	2,7	2,0	11,2
АИР200М4	37,00	92,5	0,89	1,7	1,6	2,7	2,0	11,2
АИР200L4	45,00	92,5	0,89	1,7	1,6	2,7	2,0	11,2
АИР225М4	55,00	93,0	0,89	1,7	1,6	2,6	2,0	10,7
АИР250L4	75,00	94,0	0,88	1,7	1,4	2,5	1,5	7,5
АИР250М4	90,00	94,0	0,89	1,5	1,3	2,5	1,5	7,5

Выписать технические данные выбранного электродвигателя по форме табл. 5.4.

Таблица 5.4

Технические данные асинхронного электродвигателя

Типоразмер электродвигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi$ , о. е.	$\mu_{\text{пуск}}$ , о. е.	$\mu_{\text{мин}}$ , о. е.	$\mu_k$ , о. е.	$s_n$ , %	$s_k$ , %

Найти номинальные потери электродвигателя по мощности:

$$\Delta P_n = P_n \left( \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right), \quad (5.4)$$

где  $\eta_n$  – номинальный КПД электродвигателя, о. е.;

$P_n$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Определить потери в электродвигателе при частных нагрузках:

$$\Delta P_1 = P_1 \left( \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} \right); \quad (5.5)$$

$$\Delta P_2 = P_2' \left( \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} \right) \text{ и т. д.}, \quad (5.6)$$

где  $P_1'$ ,  $P_2'$  и т. д. – приведенная к валу электродвигателя мощность на отдельных ступенях нагрузки, кВт:

$$P_1' = \frac{P_1}{\eta_{\text{пер}}}; \quad P_2' = \frac{P_2}{\eta_{\text{пер}}} \text{ и т. д.}; \quad (5.7)$$

$\eta_1$ ,  $\eta_2$  и т. д. – КПД электродвигателя на отдельных ступенях нагрузки, о. е.:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \right) \left( \frac{\alpha_{\text{н}} + x_1}{x_1} \right) \left( \frac{x_1}{\alpha_{\text{н}} + 1} \right)}; \quad (5.8)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \right) \left( \frac{\alpha_{\text{н}} + x_2}{x_2} \right) \left( \frac{x_2}{\alpha_{\text{н}} + 1} \right)} \text{ и т. д.}, \quad (5.9)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент номинальных потерь, показывает отношение постоянных потерь к переменным, о. е.; принять  $\alpha_{\text{н}} = 0,6$ ;

$x$  – кратность нагрузки, о. е.:

$$x_1 = \frac{P_1'}{P_{\text{н}}}; \quad x_2 = \frac{P_2'}{P_{\text{н}}} \text{ и т. д.} \quad (5.10)$$

Определить средние потери:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4 + \Delta P_5 t_5 + \Delta P_6 t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}. \quad (5.11)$$

Сравнить потери номинальные и средние. Если электродвигатель выбран правильно, должно выполняться условие

$$\Delta P_n \geq \Delta P_{cp}. \quad (5.12)$$

Если условие (5.12) не выполняется, необходимо выбрать электродвигатель на ступень выше.

### ***К пункту 5 плана занятия***

Проверка по условиям пуска с учетом пониженного напряжения ( $U = 0,9$ ) производится по уравнениям

$$\begin{cases} M_{\text{пуск}} U^2 \geq 1,2 M_{\text{тр}}; \\ M_{\text{мин}} U^2 \geq 1,1 M_1, \end{cases} \quad (5.13)$$

где  $M_{\text{пуск}}$  – пусковой момент выбранного электродвигателя, Н·м;  
 $M_{\text{пуск}} = \mu_{\text{пуск}} M_n$ ;

$M_{\text{тр}}$  – момент трогания рабочей машины, Н·м;

$M_{\text{мин}}$  – минимальный момент при пуске, Н·м;  $M_{\text{мин}} = \mu_{\text{мин}} M_n$ ;

$$\begin{cases} 0,81 M_{\text{пуск}} \geq 1,2 M_{\text{тр}}; \\ 0,81 M_{\text{мин}} \geq 1,1 M_1; \end{cases} \quad (5.14)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad (5.15)$$

$$\omega_n = \omega_0 (1 - s_n); \quad (5.16)$$

$$M_{\text{тр}} = 1,2 M_1, \quad (5.17)$$

где  $\omega_0 = 157$  рад/с;

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_n \eta_{\text{пер}}}. \quad (5.18)$$

### ***К пункту 6 плана занятия***

Проверка на преодоление максимальной нагрузки рабочей машины проводится по условию

$$M_k > 1,1M_{\text{макс. нагр}}, \quad (5.19)$$

где  $M_k$  – критический момент электродвигателя, Н·м;  $M_k = \mu_k M_H$ ;

$M_{\text{макс. нагр}}$  – приведенный к валу двигателя наибольший момент нагрузки, Н·м.

Из нагрузочной диаграммы следует, что

$$M_{\text{макс. нагр}} = \frac{P_3}{\eta_{\text{пер}} \omega_H}. \quad (5.20)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Каков порядок выбора электродвигателя по мощности для режима S1?
2. Как можно узнать КПД электродвигателя при нагрузке 50 %  $P_H$ , не пользуясь формулой (5.8)?
3. Какой режим работы у электродвигателя, если он работает 20 мин, а постоянная времени нагревания составляет 15 мин?
4. Для каких режимов работы промышленностью выпускаются АД?
5. Чем отличаются между собой АД для продолжительного режима работы от АД, выпускаемых для работы в динамических режимах?

## Практическое занятие № 6

### ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ S2

**Цель занятия:** освоить методику выбора электродвигателя по мощности для работы в режиме S2.

#### Общие сведения о режиме S2

Кратковременным (S2) называют режим, при котором температура двигателя за время работы не успевает подняться до установившейся температуры, а за время паузы уменьшается до температуры окружающей среды. Стандарт устанавливает значения длительности работы двигателей: 10, 30, 60 и 90 мин.

При выборе электродвигателей по мощности возможно два варианта расчета их мощности, т. е. когда происходит выбор ЭД режима S2 для работы в режиме S2 (кратковременный) и когда происходит выбор ЭД режима S1 для работы в режиме S2.

Рассмотрим *первый вариант*:

1. По нагрузочной диаграмме электропривода определяют эквивалентную мощность:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad \text{при } \omega = \text{const}; \quad (6.1)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( P_i \frac{\omega_H}{\omega_i} \right)^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad \text{при } \omega = \text{var}. \quad (6.2)$$

2. По нагрузочной диаграмме электропривода определяют время работы рабочей машины  $t_p$ .

3. По каталогу выбирают ближайший АД, больший по мощности, чем расчетная  $P_э$ , электродвигатель с мощностью  $P_{кр}$  и длительностью работы  $t_{кр}$ .

4. Проводят пересчет мощности  $P_{кр}$  с учетом уточнения времени работы

$$P_{кр} \geq P_э \sqrt{\frac{t_p}{t_{кр}}}. \quad (6.3)$$

5. Проверяют выбранный электродвигатель по условиям пуска и преодоления максимального момента сопротивления рабочей машины.

Предложенный вариант выбора двигателя является оптимальным, но для этого необходима специальная серия АД для работы в режиме S2. В настоящее время электротехнические заводы Республики Беларусь выпускают такие двигатели только под заказ.

Поэтому далее рассмотрим *второй вариант* выбора ЭД – режима S1 для работы в режиме S2.

### **Задача занятия**

При реконструкции кормораздатчика выбрать электродвигатель и проверить его по условиям пуска и на преодоление максимальной нагрузки.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. Чем характеризуется режим работы S2?
2. Какое соотношение между временем паузы и постоянной времени охлаждения соответствует режиму S2?

### **План занятия**

1. Выписать исходные данные по варианту.
2. Построить нагрузочную диаграмму.
3. Определить эквивалентную мощность нагрузочной диаграммы. Предварительно выбрать двигатель по мощности и частоте вращения.

4. Определить для выбранного электродвигателя коэффициенты термической и механической перегрузок. Выбрать двигатель с учетом этих коэффициентов.

5. Проверить выбранный электродвигатель по условиям пуска и преодоления максимального приведенного момента сопротивления рабочей машины.

### Методические указания

#### К пункту 1 плана занятия

Исходные данные согласно варианту из табл. 6.1 записать по форме табл. 6.2.

Таблица 6.1

Исходные данные

Вариант	Параметры приведенной к валу электродвигателя нагрузочной диаграммы				Синхронная частота вращения электромагнитного поля электродвигателя $n_0$ , об/мин
	Мощность в начальный период работы $P_1$ , кВт	Мощность в конечный период работы $P_2$ , кВт	Продолжительность работы $t_1$ , мин	Продолжительность паузы $t_2$ , мин	
1	2	3	4	5	6
1	0,20	0,80	20	200	1500
2	0,28	1,10	21	210	1500
3	0,40	1,60	22	220	1500
4	0,55	2,20	23	230	1500
5	0,80	3,30	24	240	1500
6	1,10	4,50	25	250	1500
7	1,50	6,00	26	260	1500
8	2,00	8,00	27	270	1500
9	2,80	11,00	28	280	1500
10	4,00	16,00	29	290	1500
11	0,14	0,55	19	190	1000
12	0,21	0,81	20	200	1000
13	0,27	1,20	21	210	1000
14	0,41	1,70	22	220	1000
15	0,56	2,30	23	230	1000
16	0,81	3,40	24	240	1000
17	1,20	4,50	25	250	1000

1	2	3	4	5	6
18	1,60	6,20	26	260	1000
19	2,20	8,20	27	270	1000
20	2,80	11,20	28	280	1000
21	4,20	16,10	29	290	1000
22	0,15	0,56	19	190	750
23	0,19	0,78	20	200	750
24	0,27	1,00	21	210	750
25	0,39	1,50	22	220	750
26	0,54	2,10	23	230	750
27	0,79	3,20	24	240	750
28	1,00	4,40	25	250	750
29	1,40	6,00	26	260	750
30	1,90	7,90	27	270	750

Таблица 6.2

Исходные данные по варианту

Вариант	Параметры приведенной к валу электродвигателя нагрузочной диаграммы				Синхронная частота вращения электромагнитного поля электродвигателя $n_0$ , об/мин
	Мощность в начальный период работы $P_1$ , кВт	Мощность в конечный период работы $P_2$ , кВт	Продолжительность работы $t_1$ , мин	Продолжительность паузы $t_2$ , мин	

**К пункту 2 плана занятия**

Соблюдая масштаб, построить нагрузочную диаграмму таким образом, чтобы ее размер составлял не менее 10×15 см (образец представлен на рис.).

**К пункту 3 плана занятия**

Эквивалентная мощность нагрузочной диаграммы определяется по уравнению

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3}}. \quad (6.4)$$

Выбрать ближайший по мощности электродвигатель из табл. 6.3. Обратить внимание на соответствие частоты вращения.

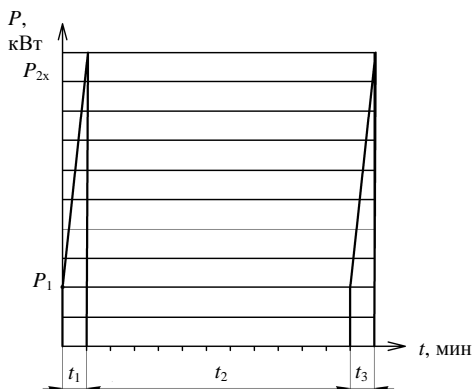


Рис. Пример нагрузочной диаграммы

Таблица 6.3

Технические данные двигателей серии АИР

Типоразмер	$P_n$ , кВт	КПД $\eta$ , %	Синхронная частота вращения $n_0$ , об/мин	$s_n$ , о. е.	$\mu_{\text{пуск}}$	$\mu_k$	$\mu_{\text{мин}}$	Масса $m$ , кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
АИР63А4	0,25	68,0	1500	12,0	2,3	2,2	1,8	4,70
АИР63В4	0,37	68,0	1500	12,0	2,3	2,2	1,8	5,60
АИР71А4	0,55	70,5	1500	9,5	2,3	2,2	1,8	7,80
АИР71В4	0,75	73,0	1500	10,0	2,2	2,2	1,6	8,80
АИР80А4	1,10	75,0	1500	7,0	2,2	2,2	1,6	9,90
АИР80В4	1,50	78,0	1500	7,0	2,2	2,2	1,6	12,10
АИР90L4	2,20	81,0	1500	7,0	2,1	2,2	1,6	17,00
АИР100S4	3,00	82,0	1500	6,0	2,0	2,2	1,6	21,60
АИР100L4	4,00	85,0	1500	6,0	2,0	2,2	1,6	27,30
АИР112M4	5,50	85,5	1500	4,5	2,0	2,5	1,6	41,00
АИР132S4	7,50	87,5	1500	4,0	2,0	2,5	1,6	58,00
АИР132M4	11,00	87,5	1500	3,5	2,0	2,7	1,6	70,00
АИР63А6	0,19	56,0	1000	14,0	2,0	2,2	1,6	4,65
АИР63В6	0,25	59,0	1000	14,0	2,0	2,2	1,6	5,60
АИР71А6	0,37	63,0	1000	8,5	2,0	2,2	1,6	7,80
АИР71В6	0,55	68,5	1000	8,5	2,0	2,2	1,6	8,60
АИР80А6	0,75	70,0	1000	8,0	2,0	2,2	1,6	11,60
АИР80В6	1,10	74,0	1000	8,0	2,0	2,2	1,6	13,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9
АИР90L6	1,50	76,0	1000	7,5	2,0	2,2	1,6	16,90
АИР100L6	2,20	81,0	1000	5,5	2,0	2,2	1,6	22,80
АИР112МА6	3,00	81,0	1000	5,0	2,0	2,2	1,6	35,00
АИР112МВ6	4,00	82,0	1000	5,0	2,0	2,2	1,6	40,40
АИР132S6	5,50	85,0	1000	4,0	2,0	2,2	1,6	57,00
АИР132М6	7,50	84,5	1000	4,0	2,0	2,2	1,6	68,00
АИР160S6	11,00	88,0	1000	3,0	2,0	2,2	1,6	100,00
АИР71В8	0,25	56,0	750	8,0	1,8	1,9	1,4	7,80
АИР80А8	0,37	60,0	750	6,5	1,8	1,9	1,4	13,80
АИР80В8	0,55	64,0	750	6,5	1,8	1,9	1,4	13,50
АИР90LА8	0,75	70,0	750	7,0	1,6	1,7	1,2	19,70
АИР90LВ8	1,10	72,0	750	7,0	1,6	1,7	1,2	22,30
АИР100L8	1,50	76,0	750	6,0	1,6	1,7	1,2	31,30
АИР112МА8	2,20	76,5	750	5,5	1,8	2,2	1,6	36,00
АИР112МВ8	3,00	79,0	750	5,5	1,8	2,2	1,4	41,00
АИР132S8	4,00	83,0	750	4,5	1,8	2,2	1,4	56,00
АИР132М8	5,50	83,0	750	5,0	1,8	2,2	1,4	70,00
АИР160S8	7,50	87,0	750	3,0	1,6	2,4	1,4	100,00
АИР160М8	11,00	87,5	750	3,0	1,6	2,4	1,4	120,00

#### К пункту 4 плана занятия

Постоянную времени нагрева  $T_n$  выбранного электродвигателя определить по формуле

$$T_n = \frac{C}{A}, \quad (6.5)$$

где  $A$  – теплоотдача двигателя, Дж/(°С·с);

$C$  – теплоемкость двигателя Дж/°С:

$$C = C_{уд}m,$$

где  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость, Дж/(°С·кг);

$m$  – масса двигателя, кг.

Так как двигатель состоит из медной обмотки массой  $m_1$ , электротехнической стали массой  $m_2$  и, как правило, чугунного корпуса массой  $m_3$ , то

$$C = \sum_{i=1}^3 C_{уд_i} m_i, \quad (6.6)$$

где  $C_{уд1} = 400$  Дж/(°С·кг) – удельная теплоемкость меди;

$C_{уд2} = 460$  Дж/(°С·кг) – удельная теплоемкость электротехнической стали;

$C_{уд3} = 540$  Дж/(°С·кг) – удельная теплоемкость чугуна корпуса.

Учитывая соотношение масс  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , принять  $C_{уд} = 480$  Дж/(°С·кг).

Теплоотдачу двигателя  $A$  определить через его номинальные потери  $\Delta P$  и допустимое превышение температуры обмоток двигателя над окружающей средой  $\tau_{доп. ном}$ , зависящее от класса изоляции двигателя:

$$A = \frac{\Delta P_{н}}{\tau_{доп. ном}} = \frac{P_{н} \left( \frac{1 - \eta_{н}}{\eta_{н}} \right)}{\tau_{доп. ном}}. \quad (6.7)$$

Тогда

$$T_{н} = \frac{C}{A} = \frac{480m}{P_{н} \left( \frac{1 - \eta_{н}}{\eta_{н}} \right) \frac{1}{\tau_{доп. ном}}}, \quad (6.8)$$

где  $\tau_{доп. ном} = 80$  °С; остальные данные – из табл. 6.3.

Коэффициент термической перегрузки

$$K_{\tau} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_1}{T_{н}}}}. \quad (6.9)$$

Коэффициент механической перегрузки

$$K_{м} = \sqrt{K_{\tau} (1 + \alpha) - \alpha}, \quad (6.10)$$

где  $\alpha$  – отношение постоянных потерь к переменным; принять  $\alpha = 0,6$ .

Требуемая мощность электродвигателя с учетом коэффициента механической перегрузки

$$P'_n = \frac{P_3}{K_M}. \quad (6.11)$$

Из табл. 6.3 выбрать электродвигатель по условию

$$P''_n \geq P'_n. \quad (6.12)$$

**К пункту 5 плана занятия**

Выбранный электродвигатель проверить по условиям пуска:

$$\begin{cases} M_{\text{пуск}}(1 - \Delta U)^2 \geq 1,2M_1; \\ M_{\text{мин}}(1 - \Delta U)^2 \geq 1,1M_1, \end{cases} \quad (6.13)$$

где  $\Delta U$  – снижение напряжения при пуске,  $\Delta U = 0,1$ ;

$M_{\text{пуск}}$  – пусковой момент электродвигателя, Н·м;

$M_1$  – момент сопротивления при нагрузке  $P_1$ , Н·м;

$M_{\text{мин}}$  – минимальный момент электродвигателя, Н·м.

Момент сопротивления при нагрузке  $P_1$

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_n}. \quad (6.14)$$

Пусковой момент электродвигателя

$$M_{\text{пуск}} = \mu_{\text{пуск}} M_n. \quad (6.15)$$

Минимальный момент электродвигателя

$$M_{\text{мин}} = \mu_{\text{мин}} M_n. \quad (6.16)$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (6.17)$$

Номинальная угловая скорость ротора

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n). \quad (6.18)$$

Синхронная угловая скорость электромагнитного поля статора

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = 0,1045n_0. \quad (6.19)$$

Выбранный электродвигатель следует проверить на преодоление максимальной нагрузки на валу по формуле

$$M_k > 1,1M_2. \quad (6.20)$$

Максимальная нагрузка на валу  $P_2$  характеризуется моментом  $M_2$ :

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_n}. \quad (6.21)$$

Критический момент электродвигателя

$$M_k = \mu_k M_n. \quad (6.22)$$

Если по условиям пуска и преодоления максимальной нагрузки электродвигатель подходит, расчет считают законченным.

Если условия не выполняются, выбирают ближайший больший по шкале электродвигатель и повторяют расчеты по формулам (6.13)–(6.22).

### Контрольные вопросы и задания

1. Опишите методики выбора двигателя по мощности для режима  $S_2$ .
2. Как изменяется коэффициент термической перегрузки  $K_t$  от отношения  $t_1 / T_n$ ?
3. Как изменяется коэффициент механической перегрузки  $K_m$  от отношения  $t_1 / T_n$ ?
4. По каким параметрам, кроме мощности, выбирается электродвигатель?

## Практическое занятие № 7

### ВЫБОР АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СКРЕБКОВОГО НАВОЗООБОРОЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА КРУГОВОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель занятия:** освоить методику выбора электродвигателя для привода горизонтального навозооборотного транспортера кругового движения.

#### Общие сведения о скребковых транспортерах

Для удаления навоза из животноводческих помещений применяются скребковые транспортеры кругового движения типа ТСН-2Б, ТСН-3Б, ТСН-160 (рис. 7.1); скреперные установки УС-10, УС-12, УС-15. Их оценка по коэффициенту энергоемкости процесса удаления навоза, т. е. по расходу энергии на единицу массы груза  $Q$  на единицу расстояния  $l$  в единицу времени

$$K_3 = \frac{\sum P}{Q \sum l},$$

показывает высокую эффективность процесса.

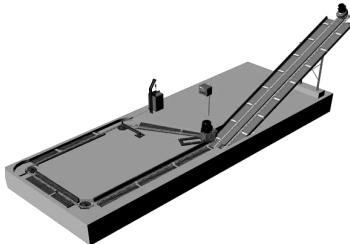


Рис. 7.1. Конструкция навозооборотного транспортера ТСН-160

Значения коэффициентов энергоемкости процессов различных транспортеров приведены в табл. 7.1.

Коэффициенты энергоемкости различных транспортеров, о. е.

Коэффициент	Вид транспортера				
	ленточный	ковшовый	скребковый	винтовой	пневматический
$K_3$ , о. е.	1,0	2,0	3,0–4,0	4,0–6,0	5,0–12,0

По принципу действия средства для уборки навоза бывают кругового и возвратно-поступательного действия.

Скреперные установки возвратно-поступательного действия состоят из скреперов, троса, приводного и натяжного устройств, а приводное устройство – из электродвигателя, редуктора и тросовой лебедки.

Скреперные установки предназначены для уборки навоза из открытых навозных проходов животноводческих помещений при боксовом и комбикбксовом способах содержания животных и подачи его в поперечный канал (рис. 7.2). Установка убирает навоз одновременно из двух навозных проходов шириной 1800–3000 мм. Состоит из привода с механизмом реверсирования, цепного контура, двух скреперов и щита управления. Привод состоит из редуктора и механизма реверсирования (рис. 7.3). Механизм реверсирования приводится в движение приваренным к одному из звеньев цепи упором. Скрепер состоит из ползуна, шарнирно закрепленных на нем скребков и смонтированного внутри ползуна натяжного устройства (рис. 7.4). Внутри скребков имеется выдвигной резиновый чистик. Скребок складывается и раскладывается при трении его о пол навозного прохода или дно навозного лотка при уборке навоза из-под щелевых полов. Рабочая ширина захвата 1,8–3,0 м. В цепном контуре могут быть использованы круглозвенная цепь 16×80, унифицированная с цепью транспортера ТСН-160, и кованая цепь, унифицированная с цепью транспортера ТСН-3Б.



Рис. 7.2. Вид рабочего процесса скреперной установки

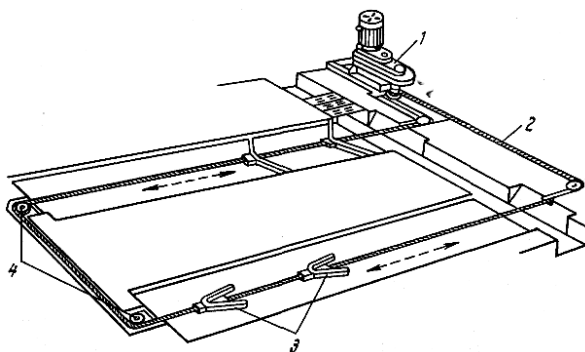


Рис. 7.3. Скреперная установка для уборки навоза УС-250:  
1 – приводная станция; 2 – цепь; 3 – скреперы; 4 – поворотные устройства



Рис. 7.4. Вид рабочего органа – скрепер

Производительность скребкового транспортера может быть определена по формуле

$$Q = c\psi v_{\text{ц}} \rho B_{\text{ск}} h_{\text{ск}},$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий влияние угла подъема транспортера,  $c = 1,00-0,35$  при  $\alpha = 10^{\circ}-45^{\circ}$ ;

$\psi$  – коэффициент заполнения,  $\psi = 0,5-0,8$ ;

$v_{\text{ц}}$  – скорость движения цепи, для навоза  $v_{\text{ц}} = 0,1-1,0$  м/с;

$\rho$  – плотность навоза (коровьего без подстилки –  $900 \text{ кг/м}^3$ , коровьего с подстилкой –  $500 \text{ кг/м}^3$ , свиного –  $1000-1400 \text{ кг/м}^3$ );

$B_{\text{ск}}$  – ширина скребков,  $B_{\text{ск}} = 0,32-0,35$  м;

$h_{\text{ск}}$  – высота скребков,  $h_{\text{ск}} = 0,06-0,08$  м.

Определение мощности приводных электродвигателей может проводиться как по универсальным формулам, так и по частным –

уточненным. В процессе научных исследований по отдельным транспортерам появляются уточняющие коэффициенты и специальные формулы для расчета усилий и общей мощности на привод. Однако с достаточной степенью точности можно пользоваться и универсальными формулами, например:

$$P = \frac{9,81Q(f_{\text{тр}} L \cos \alpha \pm H)}{\eta_{\text{общ}}},$$

где  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения навоза о желоб;

$L$  – длина транспортера;

$\alpha$  – угол наклона транспортера к горизонту;

$H$  – уровень подъема или опускания груза, м;

$\eta_{\text{общ}}$  – общий КПД передач, равный произведению КПД отдельных ступеней: клиноремная – 0,90–0,95, редуктор – 0,90–0,96, цепная – 0,92.

Коэффициенты трения навоза о поверхность канала даны в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Значения коэффициента трения навоза в зависимости от типа подстилки и материала канала (при влажности навоза 60 %–70 %)

Материал канала	Коэффициенты трения			
	Без подстилки	Солома	Торф	Опилки
Сталь	0,9	0,7	1,1	0,8
Бетон	1,0	0,7	1,3	0,9
Сосна	1,2	0,8	1,1	1,0
Дуб	1,1	0,7	1,1	0,9

Из практических исследований, приведенных в литературе, известно, что при скорости скребков  $v = 0,19$  м/с транспортеров ТСН при расстоянии между скребками 1,28 м удельная мощность на валу транспортера составляет 60 Вт/м при одной уборке в сутки на ферме КРС.

Удельная мощность, Вт/м, находится в обратно пропорциональной зависимости от числа уборок в сутки и в прямо пропорциональной зависимости от скорости перемещения скребков:

$$P_{уд} = \frac{60v}{0,19Z},$$

где  $v$  – скорость скребков горизонтального транспортера, м/с;  
 $Z$  – количество уборок в сутки.

Тогда максимальная мощность горизонтального транспортера, приведенная к валу электродвигателя, может быть вычислена по формуле

$$P_1 = P_{уд} L \frac{1}{\eta_{перед. общ}},$$

где  $\eta_{перед. общ}$  – общий КПД передачи, о. е.

Общий КПД передачи зависит от вида применяемых передач.

Зависимость момента сопротивления от частоты вращения для скребкового транспортера необходимо разделить на два режима: пуск и работа под нагрузкой. При запуске навозоуборочных транспортеров наблюдается повышенное значение момента сопротивления из-за завалов рабочих машин, а также примерзания скребков в зимний период. При этом момент трогания транспортера  $M_{трог}$  принимается равным  $(1,1-1,3)M_{сн}$  (рис. 7.5). В связи с этим лучше применять электродвигатели с повышенным пусковым моментом.

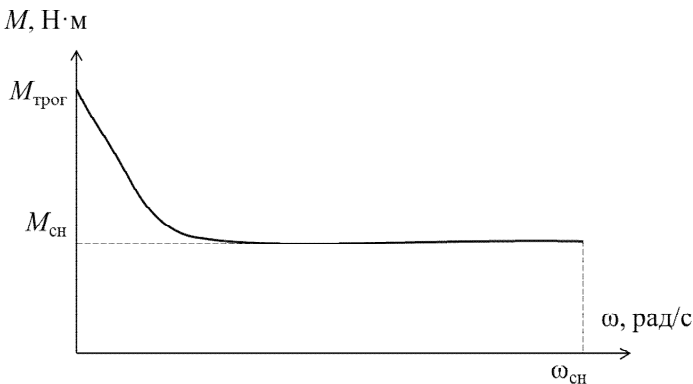


Рис. 7.5. Механическая характеристика транспортера при пуске

## **Задача занятия**

Выбрать электродвигатель для скребкового навозоуборочного транспортера и проверить выбранный электродвигатель на преодоление максимальной нагрузки (привод цепи транспортера осуществляется через редуктор, на выходном валу которого имеется приводная звездочка на восемь звеньев с шагом 0,08 м).

## **Вопросы для самоподготовки**

1. Какие типы транспортеров кругового движения используются для уборки навоза?
2. В какой зависимости находятся мощность и скорость движения транспортера?
3. Как влияет угол наклона скребкового транспортера на его производительность?
4. Как влияет коэффициент сопротивления перемещению груза для скребкового транспортера на мощность его приводного двигателя?
5. Как влияет скорость движения цепи скребкового транспортера на его производительность и мощность приводного двигателя?

## **План занятия**

1. Выписать исходные данные согласно варианту из табл. 7.3.
2. Выполнить расчеты для построения нагрузочной диаграммы и построить ее.
3. Выбрать электродвигатель.
4. Записать результаты расчетов по форме табл. 7.4.

## **Методические указания**

### ***К пункту 1 плана занятия***

Записать исходные данные из табл. 7.3 по форме табл. 7.4.

Таблица 7.3

## Исходные данные

Вариант	Горизонтальный транспортер		Количество уборок в сутки Z
	Длина цепи L, м	Скорость движения скребков v, м/с	
1	60	0,13	2
2	80	0,13	2
3	100	0,13	2
4	120	0,13	2
5	140	0,13	2
6	160	0,19	2
7	180	0,19	2
8	200	0,19	2
9	220	0,19	2
10	240	0,19	2
11	60	0,13	3
12	80	0,13	3
13	100	0,13	3
14	120	0,13	3
15	140	0,13	3
16	160	0,19	3
17	180	0,19	3
18	200	0,19	3
19	220	0,19	3
20	240	0,19	3
21	60	0,13	4
22	80	0,13	4
23	100	0,13	4
24	120	0,13	4
25	140	0,13	4
26	160	0,19	4
27	180	0,19	4
28	200	0,19	4
29	220	0,19	4
30	240	0,19	4

Исходные данные и результаты расчета горизонтального транспортера

Вариант	Дано			Вычислено						
	$L$ , м	$v$ , м/с	$Z$	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$i$ , о. е.	$t_p$ , с	$t_{xx}$ , с	$P_{экр}$ , Вт	Электродвигатель (полное обозначение)

### К пункту 2 плана занятия

Для построения нагрузочной диаграммы требуется знать мощность рабочей машины, время работы, характер изменения мощности во времени, время холостого хода и время паузы до следующего включения.

Горизонтальный транспортер начинает перемещать навоз одновременно по всему каналу. В первый момент мощность изменяется от холостого хода до максимальной нагрузки. Это происходит за короткое время:

$$t_1 = \frac{0,6l_0}{v}, \quad (7.1)$$

где  $l_0$  – расстояние между скребками, м; для горизонтального транспортера  $l_0 = 1,28$  м, для наклонного  $l_0 = 0,64$  м;

$v$  – скорость движения скребков, м/с.

В этот период происходит сдавливание навоза и образование тела волочения. Мощность будет увеличиваться до максимального значения, а далее, в процессе работы, будет уменьшаться, поскольку часть навоза будет убираться из канала. В конце уборки скребки будут перемещаться вхолостую.

Максимальная мощность зависит от числа уборок в сутки. Чем меньше уборок, тем труднее транспортеру перемещать навоз по каналу, т. к. масса навоза увеличивается.

Время работы транспортера можно определить двумя путями:

1) через производительность скребкового транспортера

$$Q = c\psi v_{ц} \rho B_{ск} h_{ск} \quad (7.2)$$

и общий выход навоза на ферме

$$K = nq, \quad (7.3)$$

где  $n$  – количество коров, обслуживаемых транспортером (ТСН длиной цепи 160 м обслуживает 100–110 голов КРС);

$q$  – суточный выход навоза от коровы в сутки (30–40 кг).

Тогда время работы транспортера при уборке навоза

$$t_p = \frac{K}{QZ}, \quad (7.4)$$

где  $Z$  – количество уборок в сутки;

2) через длину  $L$  и скорость движения  $v$  цепи транспортера

$$t_p = \frac{L}{v}. \quad (7.5)$$

Максимальную мощность горизонтального транспортера, приведенную к валу электродвигателя, также можно вычислить двумя способами:

1) по универсальной формуле

$$P_1 = \frac{9,81Q(f_{\text{тр}}L \cos \alpha \pm H)}{\eta_{\text{общ}}}; \quad (7.6)$$

2) по упрощенной формуле, предварительно определив удельную мощность

$$P = \frac{60v}{0,19Z}, \quad (7.7)$$

тогда

$$P_1 = P_{уд} L \frac{1}{\eta_{\text{перед. общ}}}, \quad (7.8)$$

где  $\eta_{\text{перед. общ}}$  – общий КПД передачи, о. е.;  $\eta_{\text{перед. общ}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3$  и т. д.

Общее передаточное число

$$i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{рм}}, \quad (7.9)$$

где  $\omega_{дв}$ ,  $\omega_{рм}$  – угловая скорость электродвигателя и рабочей машины, рад/с.

Примем  $\omega_{дв} = 150$  рад/с (четырёхполюсный асинхронный электродвигатель). Угловая скорость рабочей машины

$$\omega_{рм} = \frac{v}{R}, \quad (7.10)$$

где  $R$  – радиус приводной звездочки, м:

$$R = \frac{Z_{зв} t_{ц}}{2\pi}, \quad (7.11)$$

где  $Z_{зв}$ ,  $t_{ц}$  заданы в условии задачи ( $Z_{зв} = 8$ ,  $t_{ц} = 0,08$  м).

Если по формуле (7.9)  $400 > i > 100$ , то применяется двухступенчатый механический редуктор; если  $i > 400$  – трехступенчатый; если  $i < 100$  – одноступенчатый.

КПД одной ступени редуктора  $\eta_1 = 0,98$ .

Мощность холостого хода примем

$$P_2 = 0,2P_1. \quad (7.12)$$

Время холостого хода

$$t_{xx} = 0,05t_p. \quad (7.13)$$

Время пауз

$$t_o = \frac{24 \cdot 3600}{Z} - (t_p + t_{xx}). \quad (7.14)$$

По результатам этих расчетов строится нагрузочная диаграмма, как показано на рис. 7.6.

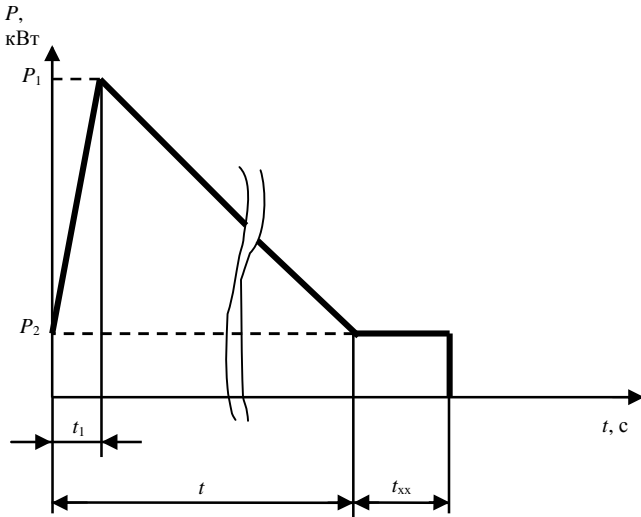


Рис. 7.6. Нагрузочная диаграмма горизонтального транспортера

**К пункту 3 плана занятия**

Поскольку  $t_o \gg t_p + t_{xx}$ , то режим работы электродвигателя – S2. Выбирается АД режима S1 для работы в кратковременном режиме S2.

Эквивалентная мощность за время работы

$$P_{\text{эkv1.2}} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3}}; \quad (7.15)$$

$$P_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{P_{\text{эkv1.2}}^2 t_p + P_{xx}^2 t_{xx}}{t_p + t_{xx}}}. \quad (7.16)$$

Выбирается ближайший больший по мощности электродвигатель (табл. 7.5) с учетом условия  $P_n \geq P_{\text{эв}}$ .

Таблица 7.5

Технические данные четырехполюсных АД с КЗ-ротором (от 0,37 до 11 кВт)

Типоразмер электродвигателя	Номинальная мощность $P_n$ , кВт	Номинальные значения			Кратности моментов, о. е.			Кратность пускового тока $k_p$ , о. е.	Момент инерции $J_{p,л}$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса $m$ , кг
		$\eta$ , %	$\cos\phi_n$ , о. е.	скольжения $s_n$ , %	пускового $I_{пук}$	критического $I_{крит}$	минимального $I_{мин}$			
АИР63В4	0,37	68,0	0,70	12,0	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,70	9,5	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73,0	0,76	10,0	2,2	2,2	1,6	5,0	0,0014	8,8
АИР80А4	1,10	75,0	0,81	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,50	78,0	0,83	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90L4	2,20	81,0	0,83	7,0	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17,0
АИР100S4	3,00	82,0	0,83	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,0087	21,6
АИР100L4	4,00	85,0	0,84	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,0110	27,3
АИР112М4	5,50	85,5	0,86	4,5	2,0	2,5	1,6	7,0	0,0170	41,0
АИР132S4	7,50	87,5	0,86	4,0	2,0	2,5	1,6	7,5	0,0280	58,0
АИР132М4	11,00	87,5	0,87	3,5	2,0	2,7	1,6	7,5	0,0400	70,0

Постоянная времени нагрева электродвигателя

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{480m}{\frac{\Delta P_n}{\tau_{\text{доп}}}}, \quad (7.17)$$

где  $m$  – масса электродвигателя, кг (табл. 7.5);

$\tau_{\text{доп}} = 80$  °С;

$\Delta P_n$  – номинальные потери в двигателе, Вт:

$$\Delta P_n = P_n \frac{(1 - \eta_n)}{\eta_n}, \quad (7.18)$$

где  $P_n$  – мощность выбранного двигателя, Вт;  
 $\eta_n$  – по табл. 7.5.

Коэффициенты термической и механической перегрузок для выбранного электродвигателя:

$$K_\tau = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p + t_{xx}}{T_n}}}; \quad (7.19)$$

$$K_M = \sqrt{K_\tau(1 + \alpha_n) - \alpha_n}, \quad (7.20)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент потерь мощности (по табл. 7.6 для двигателя мощностью  $P_n$ ).

Таблица 7.6

Номинальный коэффициент потерь  $\alpha_n$  четырехполюсных АД с короткозамкнутым ротором при  $n_0 = 1500$  об/мин

Тип электродвигателя	$P_n$ , кВт	$\alpha_n$ , о. е.
АИР63В4	0,37	0,57
АИР71А4	0,55	0,56
АИР71В4	0,75	0,34
АИР80А4	1,10	0,39
АИР80В4	1,50	0,30
АИР90L4	2,20	0,26
АИР100S4	3,00	0,36
АИР100L4	4,00	0,35
АИР112М4	5,50	0,36
АИР132S4	7,50	0,69
АИР132М4	11,00	0,44

Поскольку пуск электродвигателя производится практически вхолостую, определяющим будет нагрев электродвигателя и его проверка на преодоление максимальной нагрузки  $P_1$ .

Уточненная мощность электродвигателя

$$P'_H \geq \frac{P_1}{K_M}. \quad (7.21)$$

Типоразмер двигателя выбирается по табл. 7.5.

Проверка выбранного электродвигателя на преодоление максимальной нагрузки:

$$M_K u_2^2 > 1,1 M_{\text{макс. нагр}}; \quad (7.22)$$

$$M_K = \mu_K M_H; \quad (7.23)$$

$$M_H = \frac{P'_H}{\omega_H}; \quad (7.24)$$

$$\omega_H = \omega_0(1 - s_H); \quad (7.25)$$

$$\omega_0 = 0,1045 n_0; \quad (7.26)$$

$$M_{\text{макс. нагр}} \approx \frac{P_1}{\omega_H}, \quad (7.27)$$

где  $\mu_K$ ,  $s_H$  – по табл. 7.5;

$$u_2 = 0,9.$$

Если электродвигатель не проходит по условию (7.22), выбирают больший по мощности двигатель и повторяют расчеты проверки.

Для навозоуборочных транспортеров выбирают двигатели сельскохозяйственного исполнения (в обозначении – буква С), климатического исполнения У, категории размещения 1.

#### **К пункту 4 плана занятия**

Данные расчетов занести в табл. 7.4.

## Контрольные вопросы

1. Какова методика выбора электродвигателя для горизонтального транспортера?
2. Из каких составляющих складывается усилие, которое должен преодолеть электродвигатель при работе транспортера?
3. В какой период работы электродвигателя горизонтального транспортера потребляется наибольшая и наименьшая мощность?
4. Какой режим работы характерен для транспортеров уборки навоза?
5. При каком количестве уборок навоза в течение суток режим работы электропривода скребкового транспортера наиболее тяжелый? Почему?
6. Целесообразно ли использовать устройство плавного пуска для скребкового навозоуборочного транспортера?
7. Как зависит мощность электродвигателя привода транспортера при возрастании скорости цепи?

## Практическое занятие № 8

### ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОДАЧИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Цель занятия:** освоить методику определения экономии электроэнергии при регулировании подачи центробежных машин путем изменения скорости электропривода по сравнению с изменением подачи задвижкой.

#### Общие сведения о центробежных насосах и способах регулирования их подачи

Гидравлическая машина, создающая напорное перемещение жидкости при сообщении ей энергии, называется *насосом*. Насос в совокупности с электроприводом и передаточным механизмом образует *насосный агрегат*. Комплекс оборудования, обеспечивающий работу насосов в требуемом режиме, образует *насосную установку*. Насосная установка обычно состоит из одного или нескольких насосных агрегатов, трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры, контрольно-измерительной аппаратуры, аппаратуры управления и защиты. Сооружение, в состав которого входят одна или несколько насосных установок, система энергоснабжения, вспомогательные механизмы, бытовые и производственные помещения, обеспечивающие работоспособность объекта, называется *насосной станцией*.

Основными параметрами, характеризующими режим работы насосной установки, являются подача и напор. Подача – объем жидкости, перекачиваемый насосной установкой за единицу времени ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ). Напор – разность значений удельной энергии жидкости в напорном и всасывающем патрубках насоса, необходимая для подъема жидкости на заданную высоту и для преодоления сил трения в трубопроводе. Напор связан с давлением через соотношение  $H = p / (\rho g)$ , где  $H$  – напор, м;  $p$  – давление насоса, Па;  $\rho$  – плотность жидкой среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Режимом работы насосной установки называется определенный порядок работы ее оборудования в соответствии с изменяющимися условиями работы системы в целом.

Насосные установки подразделяются на водопроводные, канализационные, теплофикационные, нефтеперекачивающие и др. Водопроводные насосные станции (ВНС) подразделяют на станции I и II подъема и станции повысительные.

ВНС I подъема забирает воду из источника водоснабжения и подает ее на очистные сооружения. Далее обработанная вода самотеком попадает в резервуары чистой воды (РЧВ).

ВНС II подъема подает воду из РЧВ по водоводам, магистралям в распределительную сеть трубопроводов, откуда она поступает к потребителю.

Если развиваемого давления недостаточно для подъема воды на требуемую высоту, сооружаются повысительные насосные станции (станции подкачки), которые осуществляют забор воды как через промежуточные резервуары, так и непосредственно из сети. В последнем случае станции работают по схеме «из трубы в трубу».

В современных насосных установках наиболее распространены лопастные насосы (центробежные и осевые).

Центробежные насосы могут быть как одноступенчатые (с одним рабочим колесом), так и многоступенчатые (с несколькими колесами). Конструктивно в зависимости от расположения вала они подразделяются на насосы горизонтальные и вертикальные.

В осевых насосах рабочее колесо вращается в сферической камере. При воздействии лопастей рабочего колеса на жидкость за счет изменения скорости течения давление над лопастью повышается, а под ней – понижается. Благодаря разности давлений жидкость перемещается вдоль оси насоса. Насосы этого типа предназначены для перекачки воды в больших количествах с небольшим напором (до 20 м). Осевые насосы (типа О) изготавливаются с жестко закрепленными лопастями рабочего колеса и с поворотными лопастями (типа ОП). Насосы обоих типов могут выпускаться в двух исполнениях: Г – с горизонтальным расположением вала, В – с вертикальным. Возможность изменения угла установки лопастей насосов ОП позволяет регулировать подачу и напор насоса в широких пределах при сохранении высоких значений КПД, поэтому этот тип насосов оснащается, как правило, нерегулируемым электроприводом.

Одной из важных характеристик насоса является зависимость его напора от подачи  $H = f(Q)$ . Часто она именуется характеристикой  $Q-H$ , или напорно-расходной. Она может быть пологой или крутой,

непрерывно снижающейся (стабильной) или сначала возрастающей, а затем снижающейся (лабильной, т. е. неустойчивой). Рабочие параметры центробежных насосов могут изменяться в относительно широких пределах. Увеличение подачи влечет за собой уменьшение напора, а уменьшение увеличивает напор. Границы рабочего диапазона подач и напоров на характеристике насоса отмечаются извилистыми вертикальными черточками или иным способом.

Для привода насосов используются преимущественно асинхронные короткозамкнутые и синхронные двигатели переменного тока.

Режимы работы насосной установки зависят от изменения водопотребления или притока сточной жидкости. Характер изменения определяется многими причинами, не зависящими друг от друга: климатическими и погодными условиями, режимом работы предприятий и организаций города, числом культурно-зрелищных мероприятий, содержанием их программ. Режим водопотребления характеризуется обычно суточными, недельными и т. п. графиками водопотребления.

Графики водопотребления характеризуются коэффициентами неравномерности.

Максимальный коэффициент неравномерности

$$K_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{ср}}}, \quad (8.1)$$

где  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\text{ср}}$  – максимальное и среднее значения водопотребления.

Минимальный коэффициент неравномерности

$$K_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{ср}}}, \quad (8.2)$$

где  $Q_{\min}$  – минимальное водопотребление.

В зависимости от того, за какой период времени берется  $Q_{\text{ср}}$ , коэффициенты неравномерности могут быть часовыми, суточными и др.

Преднамеренное изменение подачи и напора насосов в соответствии с изменяющимся режимом работы системы называется регули-

рованием. Центробежные насосы регулируются изменением степени открытия задвижки (затвора) на напорной линии или изменением частоты вращения рабочих колес (рис. 8.1).

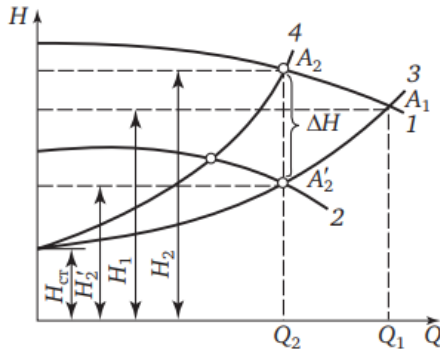


Рис. 8.1. График регулирования режима работы центробежного насоса:  
 1 — характеристика насоса при номинальной частоте вращения;  
 2 — то же при уменьшенной частоте вращения;  
 3 — характеристика трубопровода при полном открытии затвора;  
 4 — то же при уменьшении степени открытия затвора;  
 $H_1, H_2$  — напоры, соответствующие подачам  $Q_1, Q_2$ ;  
 $H_{ст}$  — статическая составляющая напора

Прикрывая затвор, увеличивают крутизну характеристики трубопровода, при этом рабочая точка насоса  $A_1$  перемещается в положение  $A_2$ . В этом случае подача уменьшается до значения  $Q_2$ , а напор, развиваемый насосом, возрастает до значения  $H_2$ . При увеличении степени открытия затвора уменьшают крутизну характеристики трубопровода. Вследствие этого подача увеличивается, а напор, развиваемый насосом, уменьшается. Этот способ регулирования, именуемый дросселированием, считается неэкономичным, т. к. на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления в затворе требуются дополнительные затраты энергии. Более экономичным способом регулирования является изменение частоты вращения насосов. При этом изменяется положение напорно-расходной характеристики насоса. Уменьшая частоту вращения, перемещают характеристику насоса вниз. При этом рабочая точка, перемещаясь по характеристике трубопровода, занимает положение  $A'_2$ , следовательно подача уменьшается и становится равной  $Q_2$ . Одновременно уменьшается

напор в сети, и напор, развиваемый насосом, становится равным  $H'_2$ . Увеличение частоты вращения увеличивает подачу и напор насоса, а также напор в сети. Этот способ регулирования более экономичен, но требует применения регулируемого электропривода, при этом обеспечивает одну и ту же подачу воды  $Q_2$  при меньшем напоре  $H_1$  на величину  $\Delta H$  относительно  $H_2$ , т. е.  $\Delta H = H_2 - H_1$ .

Снижение мощности  $\Delta P$ , потребляемой насосом, можно вычислить по формуле

$$\Delta P = 9,81 \frac{Q_2 \Delta H}{\eta_n}, \quad (8.3)$$

где  $\eta_n$  – КПД насоса.

На рис. 8.1 графические характеристики трубопровода изображаются отрезками парабол 3, 4. Пересечение характеристик  $H(Q)$  насоса и трубопровода (точки  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A'_2$ ) определяет положение рабочей точки насоса. Координаты этой точки в плоскости  $Q$ - $H$  соответствуют подаче и напору при данном режиме работы насоса и трубопровода.

Сложная конфигурация сети, ежеминутные колебания водопотребления в сети, изменение местоположения отбора воды вдоль трубопровода – все это влияет на суммарное значение потерь напора в водоводе и делает зависимость  $H_c = f(Q)$  неоднозначной. Из-за этого для изучения режимов работы насосных установок совместно с сетью введено такое понятие, как эквивалентная характеристика водопроводной сети.

Под эквивалентной характеристикой подразумевается усредненная зависимость требуемых напоров, обеспечивающих нормальное водоснабжение. Под нормальным водоснабжением в данном случае подразумевается поддержание заданных значений напоров в контрольных точках сети, ниже которых они не должны опускаться в реальном диапазоне изменения водопотребления. Эквивалентной характеристикой сети можно пользоваться для определения общих показателей, характеризующих работу водопровода, например энергопотребления или экономии энергии, а также возможного диапазона изменения подачи или требуемых напоров на выходе из насосных станций.

Насос работает наиболее экономично, если его подача и напор соответствуют максимальному значению КПД.

Вместе с тем допускается некоторое отклонение рабочих параметров таких насосов от значений, указанных в каталогах. Однако

они не должны выходить за пределы рекомендуемых подач насоса, которые отмечаются штриховыми вертикальными линиями на характеристиках  $H(Q)$ . За этими пределами насосы работают с низкими значениями КПД, при этом возможна перегрузка насосного агрегата, а также существует опасность возникновения кавитации и помпажа. Нарушение сплошности потока жидкости, сопровождаемое образованием пузырьков, заполненных парами жидкости, газами или их смесью, называется кавитацией. Явление кавитации сопровождается дополнительными потерями энергии и разрушением поверхностей рабочего колеса и корпуса насоса.

В насосах, обладающих лабильными (неустойчивыми) напорно-расходными характеристиками, возможно возникновение явления помпажа.

Лабильная характеристика насоса может пересекаться с характеристикой трубопровода в двух точках. При этом насос работает попеременно с рабочими параметрами, соответствующими этим точкам, а вся система работает неустойчиво, меняется нагрузка на агрегате, возникают гидравлические удары.

Работа насоса в режимах помпажа и кавитации недопустима.

Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров и изменению положения характеристик насоса. Пересчет характеристик насоса на другую частоту осуществляется с помощью так называемых формул приведения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{\text{ном}}}{Q_{\text{вар}}} = \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{вар}}}; \\ \frac{H_{\text{ном}}}{H_{\text{вар}}} = \left( \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{вар}}} \right)^2; \\ \frac{N_{\text{ном}}}{N_{\text{вар}}} = \left( \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{вар}}} \right)^3; \\ \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{вар}}} = \left( \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{вар}}} \right)^2, \end{array} \right. \quad (8.4)$$

где  $n_{\text{ном}}$  и  $n_{\text{вар}}$  – номинальная и переменная частоты вращения, об/мин;

$Q_{\text{ном}}$  и  $Q_{\text{вар}}$ ,  $H_{\text{ном}}$  и  $H_{\text{вар}}$ ,  $N_{\text{ном}}$  и  $N_{\text{вар}}$ ,  $M_{\text{ном}}$  и  $M_{\text{вар}}$  – подачи; напоры насоса; мощности, потребляемые насосом, и моменты сопротивления насоса при  $n_{\text{ном}}$  и  $n_{\text{вар}}$  соответственно.

Формулы приведения справедливы для турбулентного движения жидкости в насосе.

Электроэнергия, потребляемая основными насосными агрегатами, расходуется на подъем жидкости и преодоление гидродинамического сопротивления в трубопроводах. Кроме того, часть ее расходуется в самих насосных агрегатах: на преодоление сил трения в сальниках и подшипниках насосных агрегатов, нагрев стали и меди в электродвигателе, вентиляцию и т. д.

Отношение значений полезно использованной в насосном агрегате электроэнергии к электроэнергии, полученной из электрической сети, характеризуется значением КПД агрегата. Для современных насосных агрегатов в зависимости от их мощности, назначения и других факторов значение КПД варьируется в пределах от 0,3 до 0,9.

Мощность, потребляемая насосом, кВт, определяется по формуле

$$N = 9,81 \frac{QH}{\eta_n}, \quad (8.5)$$

где  $Q$  – подача, м<sup>3</sup>/с;  
 $H$  – напор, м;  
 $\eta_n$  – КПД насоса.

Мощность, потребляемая насосным агрегатом, кВт:

$$P = \frac{N}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{пр}}}, \quad (8.6)$$

где  $\eta_{\text{эд}}$  – КПД электродвигателя;  
 $\eta_{\text{пр}}$  – КПД преобразующего устройства (частотного преобразователя).

Количество электроэнергии, потребляемой агрегатом за время  $t$ , при работе с постоянной подачей и неизменным давлением

$$W = Pt, \quad (8.7)$$

где  $t$  – время работы, ч.

В реальных установках насосные агрегаты обычно работают с переменной подачей и, соответственно, с переменным давлением. Вследствие этого мощность, потребляемая агрегатом в течение некоторого времени, изменяется. Поэтому использование приведенной формулы ограничивается теми случаями, когда насосная установка длительно работает в равномерном режиме.

### **Задача занятия**

Для выбранного электродвигателя определить снижение расхода электроэнергии при регулировании подачи насоса путем изменения скорости вращения по сравнению с изменением подачи задвижкой (в регулируемом приводе насоса используется преобразователь частоты).

### **Задания для самоподготовки**

1. Назовите способы регулирования подачи центробежных машин.
2. Постройте график механической характеристики центробежного насоса.
3. Постройте график аэродинамической характеристики центробежного насоса.

### **План занятия**

1. Построить рабочую часть механической характеристики асинхронного электродвигателя  $\omega = f(M)$  и механическую характеристику насоса  $M_c = f(\omega)$  на одном графике, приняв, что электродвигатель загружен на 100 % при номинальной скорости. Диапазон регулирования скорости  $D = 2,5$ . Разбить диапазон регулирования на семь скоростей (подач).

2. Определить потребление мощности при каждой подаче в случае регулирования скорости электропривода.

3. Определить продолжительность работы насоса на каждой скорости. Принять средний закон распределения скоростей за время работы по рис. 8.2. Определить по нему продолжительность работы на каждой скорости. Общее время работы установки в году – 3000 ч.

4. Определить расход электроэнергии при регулировании подачи насоса скоростью вращения.

5. Определить потребление электроэнергии при семи подачах насоса в случае регулирования подачи задвижкой. Принять, что потребляемая мощность при подаче  $Q^* = 0$  составляет  $P_1^* = 0,4$ , а  $Q^* = 1$  при  $P_1^* = 1$ , где  $Q^*$  – подача, о. е.;  $P_1^*$  – потребляемая мощность, о. е.

6. Определить расход электроэнергии при регулировании подачи насоса задвижкой.

7. Определить экономию энергии в кВт·ч и %.

### Методические указания

#### *К пункту 1 плана занятия*

Рабочая часть механической характеристики электродвигателя строится в виде прямой линии по двум точкам.

*1-я точка* имеет координаты  $\omega = \omega_0 = 0,1045n_0$  при  $M = 0$ , где  $n_0$  – синхронная скорость электродвигателя, об/мин;  $M$  – момент электродвигателя, Н·м.

Синхронную частоту вращения электромагнитного поля электродвигателя необходимо определить как ближайшую большую к номинальной частоте вращения (табл. 8.1) электродвигателя из ряда синхронных частот вращения 3000, 1500, 1000 об/мин.

*2-я точка* имеет координаты  $\omega = \omega_n$  при  $M = M_n$ ,

$$\omega_n = 0,1045n_n, \quad (8.8)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения, табл. 8.1;

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (8.9)$$

Таблица 8.1

## Значения КПД и коэффициента мощности электродвигателей

Вариант	Тип	$P_n$ , кВт	$\eta$ , %					$\cos\varphi$					$n_n$ , об/мин
			при коэффициенте нагрузки					при коэффициенте нагрузки					
			0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	
1	АИР132М2	11,0	80,0	87,0	88,0	87,0	65,0	0,82	0,87	0,90	0,90	0,90	2900
2	АИР160S2	15,0	80,0	86,5	88,0	88,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,90	2940
3	АИР160М2	18,5	82,0	87,5	88,5	88,5	87,0	0,72	0,86	0,90	0,92	0,92	2940
4	АИР180S2	22,0	79,0	86,0	88,5	88,5	88,0	0,65	0,82	0,86	0,91	0,92	2945
5	АИР180М2	30,0	82,0	88,5	90,5	90,5	89,0	0,66	0,82	0,88	0,90	0,90	2945
6	АИР200М2	37,0	81,0	87,5	90,0	90,0	89,5	0,67	0,82	0,87	0,89	0,89	2945
7	АИР200L2	45,0	83,0	89,0	91,0	91,0	90,5	0,71	0,85	0,89	0,90	0,90	2945
8	АИР225М2	55,0	82,5	89,5	91,0	91,0	90,5	0,78	0,89	0,91	0,92	0,92	2945
9	АИР250S2	75,0	75,0	88,0	91,0	91,0	91,0	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	2960
10	АИР250М2	90,0	90,0	90,0	92,0	92,0	91,5	0,71	0,84	0,89	0,90	0,90	2960
11	АИР132М4	11,0	80,0	86,0	88,0	87,5	87,0	0,55	0,75	0,84	0,87	0,88	1460
12	АИР160S4	15,0	86,0	89,5	89,5	88,5	86,5	0,63	0,81	0,87	0,88	0,88	1465
13	АИР160М4	18,5	87,5	90,5	90,5	89,5	87,5	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88	1465
14	АИР180S4	22,0	85,5	89,5	90,0	90,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,89	1470
15	АИР180М4	30,0	87,0	90,5	91,0	91,0	89,0	0,66	0,83	0,88	0,89	0,89	1470
16	АИР200М4	37,0	87,0	90,5	91,0	91,0	90,5	0,67	0,84	0,89	0,90	0,90	1475
17	АИР200L4	45,0	88,5	92,0	92,5	92,0	91,0	0,69	0,85	0,89	0,90	0,90	1475
18	АИР225М4	55,0	88,5	92,0	92,5	92,5	91,5	0,68	0,84	0,89	0,90	0,90	1480
19	АИР250S4	75,0	88,5	92,0	93,0	93,0	92,5	0,69	0,84	0,88	0,90	0,90	1480
20	АИР250М4	90,0	89,0	92,5	93,0	93,0	92,0	0,73	0,87	0,90	0,91	0,90	1480

Вариант	Тип	$P_n$ , кВт	$\eta$ , %					$\cos\varphi$					$n_n$ , об/мин
			при коэффициенте нагрузки					при коэффициенте нагрузки					
			0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	
21	АИР160S6	11,0	83,5	87,5	87,5	86,0	83,5	0,54	0,75	0,83	0,86	0,87	975
22	АИР160М6	15,0	85,0	88,5	88,5	87,5	85,0	0,55	0,76	0,84	0,87	0,87	975
23	АИР180М6	18,5	85,0	89,0	89,0	88,0	86,0	0,54	0,76	0,84	0,87	0,87	975
24	АИР200М6	22,0	87,5	91,0	91,0	90,0	88,0	0,68	0,84	0,88	0,90	0,90	975
25	АИР200L6	30,0	88,0	91,0	91,0	90,5	89,0	0,64	0,82	0,88	0,90	0,90	980
26	АИР225М6	37,0	87,5	91,0	91,5	91,0	89,5	0,63	0,81	0,87	0,89	0,89	980
27	АИР250S6	45,0	87,5	91,0	91,5	91,5	90,5	0,64	0,82	0,87	0,89	0,89	985
28	АИР250М6	55,0	88,0	91,0	91,5	91,5	90,5	0,60	0,80	0,86	0,89	0,89	985
29	АИР280S6	75,0	90,0	92,5	92,0	92,0	90,0	0,70	0,85	0,88	0,89	0,88	985
30	АИР280М6	90,0	90,0	93,0	93,0	92,5	91,0	0,67	0,83	0,87	0,89	0,88	985

Для расчета механической характеристики рабочей машины нужно предварительно найти семь скоростей в диапазоне регулирования. Минимальная скорость соответствует значению

$$\omega_{\min} = \omega_6 = \frac{\omega_n}{D}, \quad (8.10)$$

где  $D$  – диапазон регулирования скорости вращения;  $D = 2,5$ .

Диапазон регулирования скорости вращения (от  $\omega_n$  до  $\omega_6$ ) следует разбить на шесть скоростей вращения. Разность между скоростями

$$\Delta\omega = \frac{\omega_n - \omega_6}{6}. \quad (8.11)$$

Тогда

$$\omega_1 = \omega_n - \Delta\omega;$$

$$\omega_2 = \omega_1 - \Delta\omega;$$

$$\omega_3 = \omega_2 - \Delta\omega;$$

$$\omega_4 = \omega_3 - \Delta\omega;$$

$$\omega_5 = \omega_4 - \Delta\omega;$$

$$\omega_6 = \omega_5 - \Delta\omega.$$

Значения семи выбранных скоростей занести в табл. 8.2. Выполнить расчеты моментов сопротивлений при этих скоростях по формуле

$$M_{ci} = M_{\text{сн}} \left( \frac{\omega_i}{\omega_n} \right)^2, \quad (8.12)$$

где  $M_{\text{сн}}$ ,  $\omega_n$  – момент сопротивления, Н·м, и угловая скорость, рад/с, при номинальном режиме работы;

$\omega_i$  – угловая скорость в выбранных точках, рад/с.

Для удобства расчета записать данные по форме табл. 8.2.

Таблица 8.2

Данные к расчету  $M_{ci}$  и  $P_{li}$ 

Угловая скорость $\omega_i$ , рад/с	$\frac{\omega_i}{\omega_n}$	$\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2$	$M_{ci}$ по (8.12), Н·м	Потребляемая мощность $P_{li}$ по (8.13), кВт
$\omega_n = \underline{\hspace{2cm}}$	1,0	1,00		$P_{1n} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_1 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,9	0,81		$P_{11} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_2 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,8	0,64		$P_{12} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_3 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,7	0,49		$P_{13} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_4 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,6	0,36		$P_{14} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_5 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,5	0,25		$P_{15} = \underline{\hspace{2cm}}$
$\omega_6 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,4	0,16		$P_{16} = \underline{\hspace{2cm}}$

По данным табл. 8.2 строится характеристика  $\omega = f(M_c)$  в одних осях с ранее построенной зависимостью  $\omega = f(M)$ .

### К пункту 2 плана занятия

Потребляемая мощность, кВт, при каждой скорости (подаче)

$$P_{li} = \frac{M_{ci} \omega_i}{\eta_{д.н}} \cdot 10^{-3}, \quad (8.13)$$

где  $\eta_{д.н}$  – номинальный КПД электродвигателя; при частотном регулировании можно считать, что КПД электродвигателя остается примерно одним и тем же.

### К пункту 3 плана занятия

Если по технологии работы рабочей машины затруднительно установить продолжительность работы регулируемого электропривода на каждой ступеньке скорости, обращаются к вероятным законам изменения скорости в диапазоне регулирования, графические зависимости которых представлены на рис. 8.2.

Пользуясь кривой Б (рис. 8.2), определить время работы  $T_i^*$  на каждой из семи ранее определенных скоростей вращения, записанных в табл. 8.2. Время работы  $T_i^*$  записать по форме табл. 8.3.

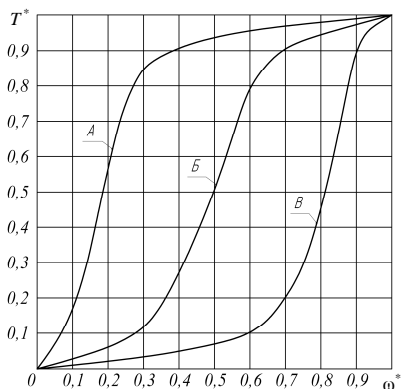


Рис. 8.2. Распределение времени работы рабочей машины в интервале регулирования скорости, о. е.:

А – с преобладанием времени на низших скоростях;

Б – со средним временем работы на нижних и высоких скоростях;

В – с преобладанием времени работы на высоких скоростях

Таблица 8.3

Определение времени работы на каждой ступени угловой скорости

Угловая скорость вращения на участке $\omega_i$ , рад/с	Угловая скорость $\omega_i^*$ , о. е.	Время $T_i^*$ , о. е.	Время $T_i$ , ч
$\omega_n = \underline{\hspace{2cm}}$	1,0	1	
$\omega_1 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,9		
$\omega_2 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,8		
$\omega_3 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,7		
$\omega_4 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,6		
$\omega_5 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,5		
$\omega_6 = \underline{\hspace{2cm}}$	0,4		
		$\sum T_i^* = \underline{\hspace{2cm}}$	$\sum T_i = 3000$ ч

В табл. 8.3 проставляют значения  $\omega^*$  и  $T^*$  с рис. 8.2, кривая Б. Затем определяют  $\sum T^*$  как сумму времени работы  $T^*$  на каждом участке и находят удельное время:

$$T_{\text{уд}} = \frac{T_{\text{раб}}}{\sum T_i^*}. \quad (8.14)$$

Общее время работы  $T_{\text{раб}}$  составляет 3000 ч.  
 Время работы на любой скорости

$$T_i = T_{\text{уд}} T_i^* \quad (8.15)$$

Например, при угловой скорости  $\omega_n$  из табл. 8.3 имеем  $T^* = 1$ , значит  $T_n = T_{\text{уд}} \cdot 1$ , для  $\omega_1$  из табл. 8.3 имеем  $T^* = 0,97$ , следовательно  $T_n = T_{\text{уд}} T_1^*$  и т. д.

**К пункту 4 плана занятия**

Расход электроэнергии при регулировании подачи насоса скоростью вращения определяется по уравнению

$$W_{\text{пер}\omega} = P_{1n}T_n + P_{11}T_1 + P_{12}T_2 + P_{13}T_3 + P_{14}T_4 + P_{15}T_5 + P_{16}T_6. \quad (8.16)$$

**К пункту 5 плана занятия**

Пользуясь рис. 8.3, установить  $P_1^{**}$  для каждой подачи. Ранее определено семь подач (скоростей вращения, поскольку  $\omega \equiv Q$ ). В относительных единицах они соответствуют значениям от  $Q_n^* = 1$  до  $Q_6^* = Q_n^* / D = 1/2,5 = 0,4$ .

Зависимость  $P_1^{**} = f(Q)^*$  для случая регулирования подачи заслонкой изображена на рис. 8.3.

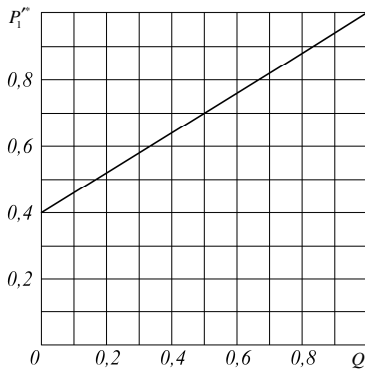


Рис. 8.3. Изменение потребляемой из сети мощности от подачи насоса при регулировании подачи задвижкой

Определение потребляемой мощности провести с записью по форме табл. 8.4.

В табл. 8.4 перевести  $P'_{li}$  в именованные единицы по формуле

$$P'_{li} = P'^{*}_{li} P_{1ном}, \quad (8.17)$$

где  $P_{1ном}$  соответствует потребляемой мощности в номинальном режиме работы, кВт (см. табл. 8.2).

Время работы  $T_i$ , ч, в табл. 8.4 соответствует значениям четвертого столбца табл. 8.3.

Таблица 8.4

Определение потребляемой мощности при каждой подаче

Подача $Q^*$ , о. е.	Параметры			
	Потребляемая мощность $P'^*$ , о. е.	Потребляемая мощность $P'_{li}$ , кВт	Время работы $T_i$ , ч	Потребленная энергия $W$ , кВт·ч
$Q_n^* = 1$	$P'_{1н}^* = 1$			
$Q_1^* = 0,9$	$P'_{11}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			
$Q_2^* = 0,8$	$P'_{12}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			
$Q_3^* = 0,7$	$P'_{13}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			
$Q_4^* = 0,6$	$P'_{14}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			
$Q_5^* = 0,5$	$P'_{15}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			
$Q_6^* = 0,4$	$P'_{16}^* = \underline{\hspace{2cm}}$			

### К пункту 6 плана занятия

Расход электроэнергии при регулировании подачи насоса задвижкой определяется по уравнению

$$W_{\text{рег. задв}} = P'_{1н} T_n + P'_{11} T_1 + P'_{12} T_2 + P'_{13} T_3 + P'_{14} T_4 + P'_{15} T_5 + P'_{16} T_6. \quad (8.18)$$

### К пункту 7 плана занятия

Экономия энергии, кВт·ч:

$$\Delta W = W_{\text{рег. задв}} - W_{\text{рег.о}}. \quad (8.19)$$

Экономия энергии, %:

$$\Delta W \% = \frac{\Delta W}{W_{\text{рег. задв}}} \cdot 100 \%. \quad (8.20)$$

### Контрольные вопросы

1. Как изменяются момент вращения и мощность центробежного насоса от частоты вращения?
2. Где теряется энергия при регулировании подачи насоса задвижкой?
3. Как изменяется КПД насоса от подачи?
4. За счет чего уменьшается энергопотребление электропривода насоса при регулировании подачи изменением его угловой скорости в сравнении с регулированием задвижкой?
5. Как избежать работы насосов в режиме помпажа и кавитации?
6. Почему  $QH$ -характеристика трубопровода непостоянна? Чем это определяется?

## Практическое занятие № 9

### ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ S3

**Цель занятия:** освоить методику выбора специального электродвигателя режима S3 для работы в режиме S3.

#### Задача занятия

Выбрать электродвигатель для подъемной лебедки (наиболее вероятный режим ее работы – S3).

#### Задания для самоподготовки

1. Охарактеризуйте режим работы S3.
2. Изобразите кривую нагрева электродвигателя, работающего в режиме S3.

#### План занятия

1. Выписать исходные данные согласно варианту (табл. 9.1). Нарисовать нагрузочную диаграмму и определить ее параметры.
2. Определить требуемую мощность электродвигателя и выбрать его тип.
3. Определить допустимое число пусков электропривода и сравнить с фактическим числом пусков.

#### Методические указания

##### *К пункту 1 плана занятия*

Нагрузочная диаграмма размером 100×150 мм строится в масштабе по образцу (рис.).

Таблица 9.1

## Исходные данные

Вариант	Параметры приведенной нагрузочной диаграммы (рис.)								Синхронная частота вращения поля статора электродвигателя $n_0$ , мин <sup>-1</sup>	Приведенный момент инерции рабочей машины $J'_{р.м}$ , кг·м <sup>2</sup>
	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$P_3$ , кВт	$P_4$ , кВт	$t_1$ , мин	$t_2$ , мин	$t_3$ , мин	$t_4$ , мин		
1	1,62	0	0,45	0	0,5	0,5	0,5	3,5	1500	0,4201
2	2,16	0	0,60	0	0,4	0,4	0,4	3,2	1500	0,5743
3	3,50	0	0,98	0	0,3	0,3	0,3	2,4	1500	0,5325
4	4,50	0	1,28	0	0,5	0,5	0,5	3,5	1500	0,6723
5	6,40	0	1,80	0	0,6	0,6	0,6	4,2	1500	0,7122
6	8,60	0	2,40	0	0,7	0,7	0,7	4,9	1500	0,7447
7	11,40	0	3,18	0	0,3	0,3	0,3	2,4	1500	0,9293
8	14,40	0	4,20	0	0,4	0,4	0,4	2,8	1500	0,9783
9	16,90	0	6,30	0	0,5	0,5	0,5	3,5	1500	0,9922
10	1,00	0	0,30	0	0,6	0,6	0,6	4,2	1000	0,5723
11	1,70	0	0,47	0	0,7	0,7	0,7	4,9	1000	0,5977
12	2,10	0	0,60	0	0,3	0,5	0,3	2,0	1000	0,9453
13	3,20	0	0,90	0	0,4	0,5	0,4	2,7	1000	0,9846
14	4,59	0	1,25	0	0,5	0,5	0,5	3,5	1000	0,9937
15	7,00	0	1,95	0	0,6	0,5	0,6	4,3	1000	1,4435
16	8,60	0	2,40	0	0,7	0,5	0,7	5,1	1000	1,5373
17	11,30	0	3,15	0	0,3	0,5	0,3	1,9	1000	1,7212
18	14,00	0	4,70	0	0,4	0,4	0,4	2,8	1000	2,0455
19	17,10	0	6,35	0	0,5	0,5	0,5	3,5	1000	2,0677
20	0,80	0	0,22	0	0,6	0,5	0,6	4,3	750	1,2577
21	1,20	0	0,33	0	0,7	0,5	0,7	5,1	750	1,2722
22	1,60	0	0,45	0	0,2	0,4	0,2	1,6	750	1,4535
23	2,10	0	0,60	0	0,2	0,3	0,2	1,3	750	1,2234
24	3,20	0	0,90	0	0,3	0,3	0,3	2,2	750	1,3475
25	4,30	0	1,20	0	0,3	0,4	0,3	2,0	750	2,0212
26	5,90	0	1,65	0	0,4	0,4	0,4	2,9	750	2,2321
27	8,60	0	2,40	0	0,5	0,4	0,5	3,6	750	2,2888
28	11,10	0	3,30	0	0,5	0,5	0,5	3,5	750	2,7789
29	14,20	0	4,50	0	0,6	0,5	0,6	4,3	750	3,4555
30	16,50	0	6,75	0	0,7	0,7	0,7	4,9	750	3,2212

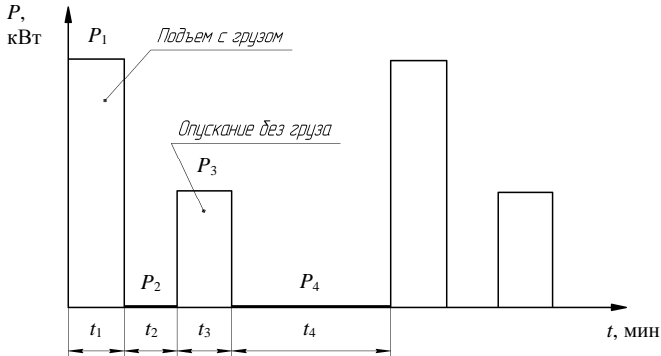


Рис. Пример нагрузочной диаграммы подъемной лебедки

Общее время работы  $t_p = t_1 + t_3$ .

Общее время паузы  $t_0 = t_2 + t_4$ .

Время цикла  $t_{ц} = t_p + t_0$  должно превышать 10 мин.

Эквивалентная мощность за время работы

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_3}}. \quad (9.1)$$

Фактическая продолжительность включения

$$\epsilon_\phi = \frac{t_p}{t_p + t_0}. \quad (9.2)$$

**К пункту 2 плана занятия**

Требуемая мощность электродвигателя режима работы S3 при ПВ = 40 % для работы в режиме S3

$$P_{н0,4} \geq P_3 \sqrt{\frac{\epsilon_\phi}{0,4(1 + \alpha') - \alpha' \epsilon_\phi}}, \quad (9.3)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент потерь, принять  $\alpha' = 0,5$ .

Выбрать ближайший больший электродвигатель из табл. 9.2 с учетом требуемой частоты вращения.

Таблица 9.2

Технические данные двигателей серии 4А с повышенным скольжением при ПВ = 40 %

Типоразмер двигателя	$P_{\text{но.4}}$ , кВт (при ПВ = 40 %)	Скольжение $s_{\text{н}}$ , %	Частота вращения $n_{\text{н}}$ , об/мин	КПД $\eta_{\text{н}}$ , %	$\mu_{\text{пуск}}$ , о. е.	$\mu_{\text{мин}}$ , о. е.	$\mu_{\text{к}}$ , о. е.	$s_{\text{к}}$ , %	$J_{\text{р. д.}}$ , кг·м <sup>2</sup>
4АС71А4	0,60	10,0	1350	68,0	2,0	1,6	2,2	39,6	0,0013
4АС71В4	0,80	10,0	1350	68,5	2,0	1,6	2,2	40,1	0,0014
4АС80А4	1,30	9,5	1358	68,5	2,0	1,6	2,2	33,8	0,0032
4АС80В4	1,70	11,0	1335	70,0	2,0	1,6	2,2	35,0	0,0033
4АС90L4	2,40	9,5	1360	76,0	2,0	1,6	2,2	33,1	0,0056
4АС100S4	3,20	7,0	1395	76,5	2,0	1,6	2,2	32,7	0,0087
4АС100L4	4,25	7,0	1395	78,0	2,0	1,6	2,2	32,0	0,0110
4АС112M4	5,60	7,0	1395	79,0	2,0	1,6	2,2	45,3	0,0170
4АС132S4	8,50	7,5	1390	82,5	2,0	1,6	2,8	49,4	0,0280
4АС71А6	0,40	8,0	920	62,5	2,0	1,6	2,1	48,6	0,0017
4АС71В6	0,63	8,0	920	65,0	2,0	1,6	2,1	49,6	0,0020
4АС80А6	0,80	14,0	860	61,0	2,0	1,6	2,1	38,3	0,0025
4АС80В6	1,20	14,0	860	66,5	2,0	1,6	2,1	38,4	0,0035
4АС90L6	1,70	10,0	900	71,0	1,9	1,6	2,1	32,9	0,0073
4АС100L6	2,60	8,0	920	75,0	1,9	1,6	2,1	32,0	0,0130
4АС112МА6	3,20	9,0	910	72,0	1,9	1,6	2,1	68,2	0,0170
4АС112МВ6	4,20	9,0	910	75,0	1,9	1,6	2,1	66,3	0,0210
4АС132S6	6,30	6,0	940	79,0	1,9	1,5	2,1	47,0	0,0400
4АС132М6	8,50	6,0	940	80,0	1,9	1,5	2,1	48,0	0,0580
4АС71В8	0,30	11,0	670	50,0	1,9	1,6	2,0	46,3	0,0019
4АС80А8	0,45	12,0	660	53,5	1,9	1,6	2,0	34,2	0,0034
4АС80В8	0,60	12,0	660	58,0	1,9	1,6	2,0	34,6	0,0041
4АС90LА8	0,80	12,0	660	61,0	1,8	1,6	2,0	32,0	0,0067
4АС90LВ8	1,20	12,0	660	85,0	1,8	1,6	2,0	32,0	0,0086
4АС100L8	1,60	10,0	675	69,0	1,8	1,6	2,0	32,0	0,0130
4АС112МА8	2,20	10,5	670	68,0	1,8	1,6	2,0	62,3	0,0180
4АС112МВ8	3,20	10,5	670	72,0	1,8	1,6	2,0	62,1	0,0240
4АС132S8	4,50	8,0	690	76,0	1,8	1,6	2,0	46,0	0,0420
4АС132М8	6,00	8,0	690	77,0	1,8	1,6	2,0	46,5	0,0580
4АС160S8	9,00	8,0	690	81,5	1,8	1,6	2,0	42,7	0,1400

Определить коэффициент перегрузки электродвигателя и сравнить с допустимой кратностью критического момента:

$$K_{\Pi} = \frac{P_1}{P_{\Pi 0,4}} < 1,1 \mu_{\kappa}. \quad (9.4)$$

**К пункту 3 плана занятия**

Допустимое число включений электродвигателя в час

$$Z_{\text{доп}} = 3600 \frac{(\Delta P_{\Pi} - \Delta P_{\epsilon}) \epsilon_{\phi} + \Delta P_{\Pi} \beta (1 - \epsilon_{\phi})}{\Delta A_{\Pi}}, \quad (9.5)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$ ,  $\Delta P_{\epsilon}$  – потери в номинальном режиме и при эффективной мощности на валу, Вт;

$\beta$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи электродвигателя при неподвижном роторе;  $\beta = 0,5$ ;

$\Delta A_{\Pi}$  – потери в переходном процессе при пуске, Дж.

Потери в номинальном режиме (значения  $P_{\Pi 0,4}$  и  $\eta_{\Pi}$  – из табл. 9.2)

$$\Delta P_{\Pi} = P_{\Pi 0,4} \frac{1 - \eta_{\Pi}}{\eta_{\Pi}}. \quad (9.6)$$

Потери при эффективной мощности на валу

$$\Delta P_{\epsilon} = P_3 \frac{1 - \eta_{\phi}}{\eta_{\phi}}; \quad (9.7)$$

$$\eta_{\phi} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \eta_{\Pi}}{\eta_{\Pi}} \right) \left( \frac{\alpha' + x}{\alpha' + 1} \right)}, \quad (9.8)$$

где  $\alpha' = 0,5$ ;

$x = P_3 / P_{\Pi 0,4}$ .

Потери в переходном процессе при пуске

$$\Delta A_{\text{п}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_0^2}{2} \approx (J'_{\text{р. м}} + J_{\text{р. д}}) \frac{\omega_0^2}{2}, \quad (9.9)$$

где  $J'_{\text{р. м}}$  – из табл. 9.1;

$J_{\text{р. д}}$  – из табл. 9.2;

$\omega_0 = 0,1045n_0$ , где  $n_0$  – из табл. 9.1.

Фактическое число включений в час

$$Z_{\text{ф}} = \frac{60}{t_{\text{ц}}}. \quad (9.10)$$

Должно соблюдаться условие

$$Z_{\text{ф}} < Z_{\text{доп}}. \quad (9.11)$$

### Контрольные вопросы

1. Почему для режима S3 применяют специальные электродвигатели? В чем их отличие от электродвигателей общепромышленной серии?

2. Какую мощность (большую или меньшую) обеспечивает электродвигатель режима S3 при работе в режиме S1?

3. Какова методика выбора электродвигателя для режима S3?

**Практическое занятие № 10**  
**ВЫБОР АСИНХРОННОГО**  
**ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ РЕЖИМА S1**  
**ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ S3**

**Цель занятия:** освоить методику выбора АД режима S1 для работы в режиме S3.

**Задача занятия**

Для заданной нагрузочной диаграммы подъемной лебедки выбрать АД с короткозамкнутым ротором.

**Вопросы для самоподготовки**

1. Чем отличается режим работы S4 от режима работы S3; S5 – от S3?
2. Какое стандартное значение ПВ имеют АД серии АИР?

**План занятия**

1. Построить нагрузочную диаграмму рабочей машины по данным табл. 10.1.
2. Найти эквивалентную мощность за цикл работы с учетом паузы. Предварительно выбрать двигатель режима S1.
3. Определить постоянную времени нагрева двигателя.
4. Определить коэффициенты термической и механической перегрузок и требуемую мощность двигателя режима S1.
5. Проверить выбранный АД на преодоление максимальной нагрузки.

**Методические указания**

**К пункту 1 плана занятия**

Строить нагрузочную диаграмму  $P = f(t)$  следует в масштабе таким образом, чтобы получить чертеж 100×150 мм по образцу (рис.).

Таблица 10.1

## Исходные данные

Вариант	Мощность по периодам, кВт				Время по периодам, мин				Синхронная частота вращения двигателя $n_0, \text{мин}^{-1}$
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	
1	0,47	0	0,15	0	0,50	1,0	0,50	1,0	1500
2	0,70	0	0,23	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
3	1,00	0	0,33	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
4	1,40	0	0,47	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
5	2,00	0	0,70	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
6	2,85	0	0,95	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
7	4,10	0	1,30	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
8	5,60	0	1,90	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
9	7,60	0	2,50	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
10	10,00	0	3,40	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
11	1,40	0	4,60	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
12	0,70	0	0,22	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
13	1,00	0	0,32	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
14	1,30	0	0,50	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
15	1,90	0	0,80	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
16	2,80	0	0,90	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
17	4,00	0	1,20	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
18	5,50	0	2,00	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
19	7,70	0	2,30	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
20	10,10	0	3,30	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
21	13,80	0	4,50	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
22	0,65	0	0,20	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
23	0,90	0	0,25	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
24	1,30	0	0,40	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
25	1,80	0	0,60	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
26	2,50	0	0,80	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
27	3,50	0	1,20	0	0,40	0,8	0,40	0,8	
28	5,00	0	1,60	0	0,50	1,0	0,50	1,0	
29	7,10	0	2,10	0	0,45	0,9	0,45	0,9	
30	9,00	0	3,00	0	0,40	0,8	0,40	0,8	

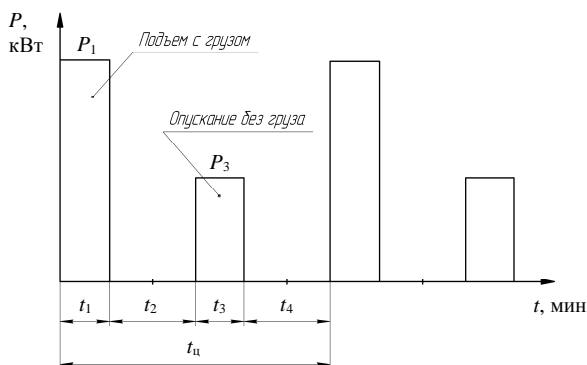


Рис. Нагрузочная диаграмма подъемной лебедки

### К пункту 2 плана занятия

Эквивалентная мощность нагрузочной диаграммы с учетом паузы

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_3 + \beta_0(t_2 + t_4)}}, \quad (10.1)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя в неподвижном состоянии; принять  $\beta_0 = 0,5$ .

По табл. 10.2 выбрать электродвигатель с учетом частоты вращения по условию

$$P'_n \geq P_3. \quad (10.2)$$

### К пункту 3 плана занятия

Постоянная времени нагрева двигателя, с:

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{C_0 m}{\frac{\Delta P_n}{\tau_{\text{доп. ном}}}}, \quad (10.3)$$

где  $C_0$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); принять  $C_0 = 480$  Дж/(кг·°С);

$m$  – масса двигателя, кг;

$\tau_{\text{доп. ном}}$  – допустимое превышение температуры изоляции обмотки двигателя, °С; принять для класса В  $\tau_{\text{доп. ном}} = 80$  °С.

Таблица 10.2

## Технические данные АД с КЗ-ротором

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	КПД $\eta_n$ , %	$s_n$ , %	$\mu_n$ , о. е.	$\mu_k$ , о. е.	$\mu_{мин}$ , о. е.	Масса $m$ , кг	$n_0$ , об/мин
АИР56В4	0,18	64,0	10,0	2,3	2,2	1,8	3,90	1500
АИР63А4	0,25	68,0	12,0	2,3	2,2	1,8	4,70	
АИР63В4	0,37	68,0	12,0	2,3	2,2	1,8	5,60	
АИР71А4	0,55	70,5	9,5	2,3	2,2	1,8	7,80	
АИР71В4	0,75	73,0	10,0	2,2	2,2	1,6	8,80	
АИР80А4	1,10	75,0	7,0	2,2	2,2	1,6	9,90	
АИР80В4	1,50	78,0	7,0	2,2	2,2	1,6	12,10	
АИР90L4	2,20	81,0	7,0	2,1	2,2	1,6	17,00	
АИР100S4	3,00	82,0	6,0	2,0	2,2	1,6	21,60	
АИР100L4	4,00	85,0	6,0	2,0	2,2	1,6	27,30	
АИР112М4	5,50	85,5	4,5	2,0	2,5	1,6	41,00	
АИР132S4	7,50	87,5	4,0	2,0	2,5	1,6	58,00	
АИР63А6	0,19	56,0	14,0	2,0	2,2	1,6	4,65	1000
АИР63В6	0,25	59,0	14,0	2,0	2,2	1,6	5,60	
АИР71А6	0,37	65,0	8,5	2,0	2,2	1,6	7,80	
АИР71В6	0,55	68,5	8,5	2,0	2,2	1,6	8,60	
АИР80А6	0,75	70,0	8,0	2,0	2,2	1,6	11,60	
АИР80В6	1,10	74,0	8,0	2,0	2,2	1,6	13,40	
АИР90L6	1,50	76,0	7,5	2,0	2,2	1,6	16,90	
АИР100L6	2,20	81,0	5,5	2,0	2,2	1,6	22,80	
АИР112МА6	3,00	81,0	5,0	2,0	2,2	1,6	35,00	
АИР112МВ6	4,00	82,0	5,0	2,0	2,2	1,6	40,40	
АИР132S6	5,50	85,0	4,0	2,0	2,2	1,6	57,00	
АИР132М6	7,50	85,5	4,0	2,0	2,2	1,6	68,00	
АИР71В8	0,25	56,0	8,0	1,8	1,9	1,4	7,80	750
АИР80А8	0,37	60,0	6,5	1,8	1,9	1,4	13,80	
АИР80В8	0,55	64,0	6,5	1,8	1,9	1,4	13,50	
АИР90LА8	0,75	70,0	7,0	1,6	1,7	1,2	19,70	
АИР90LВ8	1,10	72,0	7,0	1,6	1,7	1,2	22,30	
АИР100L8	1,50	76,0	6,0	1,6	1,7	1,2	31,30	
АИР112МА8	2,20	76,5	5,5	1,8	2,2	1,4	36,00	
АИР112МВ8	3,00	79,0	5,5	1,8	2,2	1,4	41,00	
АИР132S8	4,00	83,0	4,5	1,8	2,2	1,4	56,00	
АИР132М8	5,50	83,0	5,0	1,8	2,2	1,4	70,00	

Номинальные потери электродвигателя, Вт:

$$\Delta P_{\text{н}} = P'_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}, \quad (10.4)$$

где  $P'_{\text{н}}$  – номинальная мощность выбранного двигателя, Вт;  
 $\eta_{\text{н}}$  – КПД двигателя в номинальном режиме работы, о. е.

#### ***К пункту 4 плана занятия***

Коэффициент термической перегрузки выбранного двигателя

$$K_{\tau} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T_{\text{н}}} \varepsilon\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_{\text{н}}}}, \quad (10.5)$$

где  $t_p = t_1 + t_3$ ;

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_{\text{н}} \beta_0}, \quad \text{где } t_{\text{н}} = t_2 + t_4.$$

Коэффициент механической перегрузки

$$K_{\text{м}} = \sqrt{K_{\tau} (1 + \alpha)} - \alpha, \quad (10.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь, равный отношению постоянных потерь к переменным;  $\alpha = 0,6$ .

Требуемая мощность электродвигателя

$$P_{\text{н}} > \frac{P_{\text{макс. нагр}}}{K_{\text{м}}} = \frac{P_1}{K_{\text{м}}}. \quad (10.7)$$

Выписать технические данные двигателя из табл. 10.2.

### **К пункту 5 плана занятия**

Проверка на преодоление максимальной нагрузки:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_k > 1,1M_1; \\ M_k = \mu_k M_n; \\ M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \\ M_1 = \frac{P_1}{\omega_n}; \\ \omega_n = 0,1045n_0(1 - s_n). \end{array} \right. \quad (10.8)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Какова методика выбора электродвигателя режима  $S1$  для работы в режиме  $S3$ ?
2. Чему равны номинальные потери электродвигателя, имеющего номинальную мощность 0,75 кВт и КПД 0,75?
3. Коэффициент тепловой перегрузки  $K_\tau = 2$ . Если пренебречь постоянными потерями мощности, чему будет равен коэффициент механической перегрузки?

## Практическое занятие № 11

### НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМАХ РАБОТЫ S1, S2, S3

**Цель занятия:** научиться рассчитывать температуру обмотки электродвигателя в различных режимах работы электропривода.

#### Задача занятия

Для заданных нагрузочных диаграмм режимов работы S1, S2, S3 рабочей машины определить максимальную температуру обмотки, построить кривые изменения температуры и определить, пригоден ли выбранный электродвигатель по нагреву для работы с заданными нагрузочными диаграммами.

#### Вопросы для самоподготовки

1. Что такое постоянная времени нагрева? Как она обозначается? В каких единицах измеряется?
2. Какие классы изоляционных материалов по нагревостойкости применяют в электродвигателях?

#### План занятия

1. Выписать из табл. 11.1 технические данные заданного электродвигателя. Определить его постоянную времени нагрева и охлаждения.
2. Построить нагрузочную диаграмму режима работы S1 по данным табл. 11.2. Рассчитать и построить кривую нагрева электродвигателя за время работы. Определить по графику максимальную температуру нагрева обмотки.
3. Повторить п. 2 для режима работы S2.
4. Повторить п. 2 для режима работы S3.

Таблица 11.1

## Исходные данные

Вариант	Типоразмер двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	Масса двигателя $m$ , кг	Класс нагревостойкости
1	АИР50А4	0,06	53,0	2,60	В
2	АИР50В4	0,09	57,0	2,90	В
3	АИР56А4	0,12	63,0	3,35	В
4	АИР56В4	0,18	64,0	3,90	В
5	АИР63А4	0,25	68,0	4,70	В
6	АИР63В4	0,37	68,0	5,60	В
7	АИР71А4	0,55	70,5	7,80	В
8	АИР71В4	0,75	73,0	8,80	В
9	АИР80А4	1,10	75,0	9,90	В
10	АИР80В4	1,50	78,0	12,10	В
11	АИР90L4	2,20	81,0	17,00	В
12	АИР100S4	3,00	82,0	21,60	В
13	АИР100L4	4,00	85,0	27,30	В
14	АИР112М4	5,50	85,5	41,00	В
15	АИР132S4	7,50	87,5	58,00	В
16	АИР132М4	11,00	87,5	70,00	В
17	АИР160S4	15,00	90,0	100,00	F
18	АИР160М4	18,50	90,5	110,00	F
19	АИР180S4	22,00	90,5	170,00	F
20	АИР63А6	0,19	56,0	4,65	В
21	АИР63В6	0,25	59,0	5,60	В
22	АИР71А6	0,37	65,0	7,80	В
23	АИР71В6	0,55	68,5	8,60	В
24	АИР80А6	0,75	70,0	11,60	В
25	АИР80В6	1,10	74,0	13,40	В
26	АИР90L6	1,50	76,0	16,90	В
27	АИР100L6	2,20	81,0	22,80	В
28	АИР112МА6	3,00	81,0	35,00	В
29	АИР112МВ6	4,00	82,0	40,40	В
30	АИР132S6	5,50	85,0	57,00	В

Таблица 11.2

Нагрузочные диаграммы режимов работы  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  
приведенные к валу электродвигателя

Вариант	Режим $S1$ (рис. 11.1)				Режим $S2$ (рис. 11.2)				Режим $S3$ (рис. 11.3)			
	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$t_1$ , мин	$t_2$ , мин	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$t_1$ , мин	$t_2$ , мин	$P_1, P_3,$ $P_5, P_7,$ $P_9, P_{11},$ кВт	$P_2, P_4,$ $P_6, P_8,$ $P_{10}, P_{12},$ кВт	$t_1, t_3,$ $t_5, t_7,$ $t_9, t_{11},$ мин	$t_2, t_4,$ $t_6, t_8,$ $t_{10}, t_{12},$ мин
1	0,07	0,04	20	25	0,07	0	20	200	0,07	0	6	4
2	0,10	0,06	30	30	0,10	0	30	300	0,10	0	7	3
3	0,13	0,08	25	25	0,13	0	25	250	0,13	0	8	2
4	0,20	0,10	25	30	0,20	0	25	250	0,20	0	6	4
5	0,30	0,15	30	25	0,30	0	30	300	0,30	0	7	3
6	0,40	0,25	25	30	0,40	0	25	250	0,40	0	8	2
7	0,60	0,30	20	25	0,60	0	20	200	0,60	0	5	5
8	0,80	0,40	25	30	0,80	0	25	250	0,80	0	6	4
9	1,20	0,80	30	30	1,20	0	30	300	1,20	0	7	3
10	1,70	0,90	35	30	1,70	0	35	350	1,70	0	8	2
11	2,50	1,30	35	35	2,50	0	35	350	2,50	0	5	4
12	3,50	1,75	35	35	3,50	0	35	350	3,50	0	6	3
13	4,50	2,20	35	35	4,50	0	35	350	4,50	0	7	2
14	5,80	3,00	35	40	5,80	0	35	350	5,80	0	8	1
15	8,00	4,00	40	35	8,00	0	40	400	8,00	0	4	5
16	12,00	8,00	20	40	12,00	0	20	200	12,00	0	5	4
17	18,00	9,00	30	30	18,00	0	30	300	18,00	0	6	3
18	20,00	10,00	30	30	20,00	0	30	300	20,00	0	7	2
19	25,00	13,00	30	35	25,00	0	30	300	25,00	0	8	1
20	0,20	0,15	20	25	0,20	0	20	200	0,20	0	5	4
21	0,30	0,15	25	25	0,30	0	25	250	0,30	0	8	5
22	0,39	0,20	25	30	0,39	0	25	250	0,39	0	6	4
23	0,60	0,30	30	25	0,60	0	30	300	0,60	0	7	3
24	0,80	0,40	30	30	0,80	0	30	300	0,80	0	8	2
25	1,20	0,60	30	30	1,20	0	30	300	1,20	0	9	1
26	1,80	0,90	35	35	1,80	0	35	350	1,80	0	5	5
27	2,50	1,20	35	35	2,50	0	35	350	2,50	0	6	4
28	3,30	1,80	37	37	3,30	0	37	370	3,30	0	7	3
29	4,80	2,50	35	40	4,80	0	35	350	4,80	0	8	2
30	6,00	3,00	40	40	6,00	0	40	400	6,00	0	9	1

## Методические указания

### К пункту 1 плана занятия

Постоянная времени нагрева электродвигателя

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{C_{уд} m}{\frac{\Delta P_{ном}}{\tau_{доп. ном}}}, \quad (11.1)$$

где  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $C_{уд} = 420$  Дж/(кг·°С);

$m$  – масса двигателя, кг;

$\tau_{доп. ном}$  – номинальное превышение температуры электродвигателя;

$\tau_{доп. ном} = 80$  °С для класса нагревостойкости В,  $\tau_{доп. ном} = 100$  °С для класса F;

$\Delta P_{ном}$  – потери при номинальной нагрузке, Вт:

$$\Delta P_{ном} = P_n \left( \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right), \quad (11.2)$$

где  $\eta_n$  – КПД электродвигателя при номинальной нагрузке, о. е.;

$P_n$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

Постоянная времени охлаждения для самовентилируемых электродвигателей

$$T_o = \frac{T_n}{\beta_o} = \frac{T_n}{0,5} = 2T_n, \quad (11.3)$$

где  $\beta_o$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи в неподвижном состоянии;  $\beta_o = 0,5$ .

### К пункту 2 плана занятия

Построить нагрузочную диаграмму в масштабе по образцу (рис. 11.1). На вертикальной оси отложить мощности  $P_1$ ,  $P_2$  и потери мощности  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  (в одном масштабе). Рядом отложить ось превышения температуры  $\tau$ . Размер полей графиков  $100 \times 150$  мм.

Потери найти с использованием следующих формул:

$$\Delta P_1 = P_1 \left( \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} \right); \quad (11.4)$$

$$\Delta P_2 = P_2 \left( \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} \right); \quad (11.5)$$

$$\eta_{II} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \eta_{II}}{\eta_{II}} \right) \left( \frac{\frac{\alpha}{x_1} + x_1}{\alpha + 1} \right)}; \quad (11.6)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \eta_{II}}{\eta_{II}} \right) \left( \frac{\frac{\alpha}{x_2} + x_2}{\alpha + 1} \right)}, \quad (11.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь, равный отношению постоянных потерь к переменным; принять  $\alpha = 0,6$ .

Коэффициент загрузки двигателя:

$$x_1 = \frac{P_1}{P_H}; \quad (11.8)$$

$$x_2 = \frac{P_2}{P_H}. \quad (11.9)$$

Установившееся превышение температуры электродвигателя на каждом участке:

$$\tau_{y1} = \frac{\Delta P_1}{A} = \frac{\Delta P_1}{\frac{\Delta P_{НОМ}}{\tau_{доп.НОМ}}}; \quad (11.10)$$

$$\tau_{y2} = \frac{\Delta P_2}{A} = \frac{\Delta P_2}{\frac{\Delta P_{НОМ}}{\tau_{доп.НОМ}}}. \quad (11.11)$$

Отложить  $\Delta P_1, \Delta P_2, \tau_{y1}, \tau_{y2}$  на графике (см. образец на рис. 11.1). Расчет температуры превышения выполнить по уравнению

$$\tau_i = \tau_{oi} + (\tau_{yi} - \tau_{oi}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (11.12)$$

где  $\tau_{oi}$  – установившееся превышение температуры двигателя, которое наступило бы при неограниченно длительной его работе с нагрузкой  $i$ -го участка, °С;

$t$  – текущее значение времени по участкам, мин;

$T_n$  – постоянная времени нагрева двигателя, мин.

При расчете кривой  $\tau = f(t)$  необходимо для каждой нагрузки принимать значения текущего времени равными в начале, конце и середине выбранного участка нагрузочной диаграммы. В этом случае кривая нагревания будет строиться по трем точкам, расположенным в начале, конце и середине участка.

На первом участке значение  $\tau_o = 0$ , в конце первого участка  $\tau_{кон1} = \tau_{нач2}$ . Чтобы определить, нагрев или охлаждение будет на втором участке, необходимо сравнить начальное превышение температуры на данном участке, т. е.  $\tau_{нач2}$ , с установившимся значением  $\tau_{y2}$ . Если  $\tau_{нач2} < \tau_{y2}$ , то будет происходить нагрев электродвигателя; если  $\tau_{нач2} > \tau_{y2}$ , то охлаждение.

Спустя время  $t_{1cp}$  превышение температуры двигателя составит

$$\tau_{1cp} = 0 + (\tau_{y1} - 0) \left( 1 - e^{-\frac{t_{1cp}}{T_n}} \right) = \tau_{y1} \left( 1 - e^{-\frac{t_{1cp}}{T_n}} \right). \quad (11.13)$$

Спустя время  $t_1$  превышение температуры двигателя составит

$$\tau_{кон1} = \tau_{y1} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right). \quad (11.14)$$

Спустя время  $t_{2cp}$  превышение температуры двигателя составит

$$\tau_{2cp} = \tau_{нач2} + (\tau_{y2} - \tau_{нач2}) \left( 1 - e^{-\frac{t_{2cp}}{T_n}} \right), \quad (11.15)$$

где  $\tau_{нач2} = \tau_{кон1}$ .

Спустя время  $t_2$  превышение температуры двигателя составит

$$\tau_{кон2} = \tau_{нач2} + (\tau_{y2} - \tau_{нач2}) \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right). \quad (11.16)$$

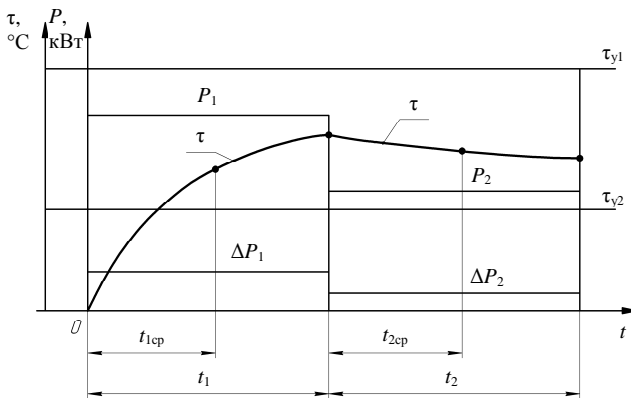


Рис. 11.1. Фрагмент построения кривой нагрева электродвигателя в режиме S1

### К пункту 3 плана занятия

Построить нагрузочную диаграмму S2 в масштабе так, чтобы по оси времени можно было отложить полное время  $t_1 + t_2$ .

Поскольку нагрузка  $P_1$  аналогична режиму S1, а время работы  $t_1$  одно и то же (табл. 11.2), то значения  $\Delta P_1$ ,  $\tau_{y1}$ ,  $\tau_{1cp}$ ,  $\tau_{2кон}$ ,  $T_n$  соответствуют режиму S1 и расчетам пункта 2 плана занятия, а кривая нагрева может быть взята из рис. 11.1.

Температура электродвигателя при охлаждении вычисляется по формуле

$$\tau_o = \tau_{кон1} e^{-\frac{t}{T_o}}. \quad (11.17)$$

Рекомендуется разбить время  $t_2$  на пять участков и подставлять их значения в формулу (11.17).

По результатам расчетов построить кривую нагрева и охлаждения электродвигателя, подобно рис. 11.2.

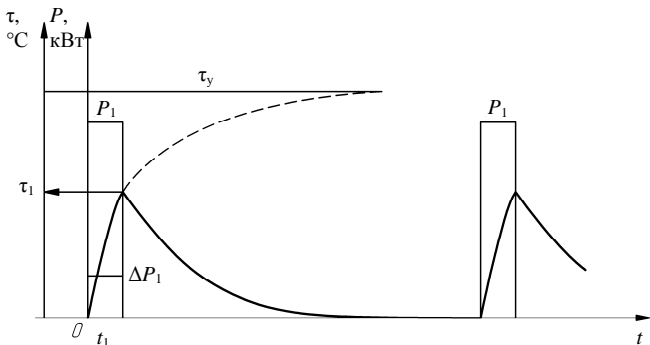


Рис. 11.2. Образец кривой нагрева электродвигателя в режиме S2

#### К пункту 4 плана занятия

Построить нагрузочную диаграмму режима S3 в масштабе так, чтобы 60 мин соответствовало 120 мм, по аналогии с рис. 11.3.

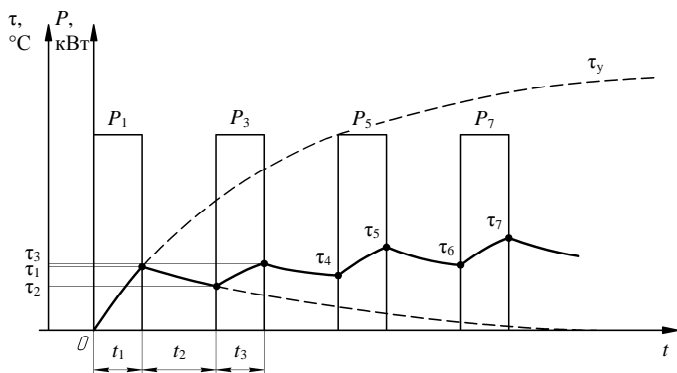


Рис. 11.3. Образец кривой нагрева и охлаждения электродвигателя в режиме S3

Поскольку значение  $P_1$  соответствует значению  $P_1$  режима S1, то значения  $\tau_{y1}$ ,  $T_H$ ,  $T_0$  соответствуют значениям расчетов пунктов 2 и 3 плана занятия, т. е.  $\tau_y = \tau_{y1}$ :

$$\tau_1 = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right); \quad (11.18)$$

$$\tau_2 = \tau_1 e^{-\frac{t_2}{T_0}}; \quad (11.19)$$

$$\tau_3 = \tau_2 + (\tau_y - \tau_2) \left( 1 - e^{-\frac{t_3}{T_n}} \right); \quad (11.20)$$

$$\tau_4 = \tau_3 e^{-\frac{t_4}{T_0}}; \quad (11.21)$$

$$\tau_5 = \tau_4 + (\tau_y - \tau_4) \left( 1 - e^{-\frac{t_5}{T_n}} \right); \quad (11.22)$$

$$\tau_6 = \tau_5 e^{-\frac{t_6}{T_0}}$$

и т. д. до  $\tau_{12}$ .

По данным расчетов построить зависимость  $\tau = f(t)$ , подобно рис. 11.3.

### Контрольные вопросы и задания

1. Почему постоянные времени нагревания и охлаждения одного и того же двигателя имеют различные значения?
2. Как определить количество тепла, выделенного электродвигателем при его работе?
3. Напишите уравнение теплового баланса для электродвигателя.
4. Изобразите кривые изменения температуры двигателя в режимах S1, S2, S3.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементьев, Ю. Н. Автоматизированный электропривод : учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск : ТПУ, 2009. – 224 с.
2. Епифанов, А. П. Электропривод : учебник / А. П. Епифанов, Л. М. Малайчук, А. Г. Гущинский ; под ред. А. П. Епифанова. – СПб. : Лань, 2020. – 400 с.
3. Никитенко, Г. В. Электропривод производственных механизмов : учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2022. – 224 с.
4. Оськин, С. В. Автоматизированный электропривод : учебное пособие / С. В. Оськин. – Краснодар : КРОН, 2013. – 489 с.
5. Фираго, Б. И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов : учебное пособие / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
6. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока : учебное пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Томск : ТПУ, 2011. – 213 с.
7. Электропривод : практикум / сост.: В. В. Гурин, Е. В. Бабаева. – Минск : БГАТУ, 2011. – 200 с.

Учебное издание

**Прищепов** Михаил Александрович,  
**Прищепова** Елена Михайловна,  
**Равинский** Николай Александрович

**ЭЛЕКТРОПРИВОД,  
ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*  
Редактор *Д. А. Значёнок*  
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*  
Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 29.12.2025. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,09. Тираж 99 экз. Заказ 388.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.