



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Кафедра «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»**

Дисциплина:

«Автоматизированный электрический привод»

Практическое занятие № 2:

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Доцент кафедры к. т. н.

ГОРПИНЧЕНКО Александр Владимирович

- 1) Выбор двигателей по роду тока и принципу действия, конструктивному исполнению и внешним воздействиям.
- 2) Определение расчетной мощности и выбор двигателя.
- 3) Проверка двигателей на достаточность пускового момента и перегрузочную способность.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер «Общий курс электропривода». М.: Энергоиздат, 1981 г.
2. М.М.Кацман. Справочник по электрическим машинам. Учебное пособие для студентов образовательных учреждений среднего проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005г.

1. Выбор двигателей по роду тока и принципу действия, конструктивному исполнению и внешним воздействиям

Положения выбора двигателей для электроприводов:

1. Электрические и механические параметры двигателей (номинальные значения мощности, напряжения, частоты вращения, относительная продолжительность включения, перегрузочная способность, начальный пусковой момент, диапазон регулирования частоты вращения и т.п.) должны соответствовать параметрам приводимых в действие механизмов.
2. Для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, независимо от мощности следует применять синхронные или асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.
3. Для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска или работы либо требующих изменения частоты вращения следует применять двигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска и регулирования частоты вращения, возможными в данной электроустановке.

4. Двигатели постоянного тока допускается применять только в случаях, когда двигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма либо неэкономичны.

5. Двигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, должны иметь исполнение по степени защиты не менее IP44 или специальное исполнение, соответствующее условиям работы конкретного электропривода (например, для химических установок, взрыво- или пожароопасных сред эксплуатации для особонизких температур окружающей среды и т.п.).

6. Двигатели, устанавливаемые в помещениях, где возможно оседание на обмотках пыли, волокон или других веществ, нарушающих охлаждение, должны иметь закрытое исполнение по степени защиты не менее IP44 или защищенное исполнение, при условии продувания внутренней полости двигателя чистым воздухом, поступающим извне по воздуховодам.

7. При установке двигателей в помещениях с температурой окружающей среды более 40°C должны быть выполнены мероприятия, исключающие возможность недопустимого перегрева двигателя.

8. Двигатели, устанавливаемые в сырых и особо сырых местах, должны иметь закрытое исполнение и влагостойкую изоляцию обмоток.

9. Вибрационные и ударные воздействия на двигатель не должны превышать значений, допустимых для данного двигателя.

10. Двигатели, устанавливаемые во взрывоопасных или пожароопасных зонах, должны выбираться в соответствии с соответствующими рекомендациями.

2. Определение расчетной мощности и выбор двигателя

5

Расчетная мощность двигателя $P_{\text{расч}}$ (кВт), требуемая для электропривода, определяется величинами статического нагрузочного момента M_c (Н·м) на валу двигателя, создаваемого рабочей машиной, и требуемой частотой вращения вала двигателя n_2 (об/мин):

$$P_{\text{расч}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M_c \frac{n_2}{\eta_{\text{мех}}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — КПД механизма с учетом редуктора.

Расчетная мощность двигателя для привода центробежного вентилятора, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{QH \cdot 10^{-3}}{\eta_v \eta_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где Q — производительность вентилятора (расход газа), м³/с;
 H — напор вентилятора (давление на выходе), Па;

η_v и $\eta_{\text{п}}$ — КПД соответственно вентилятора и механической передачи вращательного движения от двигателя на вентилятор.

Расчетная мощность для привода центробежного насоса, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \rho Q (H_c + \Delta H)}{\eta_n \eta_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

Q — подача (производительность) насоса, м³/с;

H_c — суммарный напор жидкости, т.е. наибольшая высота, на которую может подняться жидкость над точкой выхода из насоса, м;

ΔH — потеря напора в магистрали, зависящая от сечения труб, их качества, протяженности, кривизны, м.

Расчетная мощность привода поршневого компрессора, кВт,

$$P_{\text{расч}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} Q (A_{\text{и}} + A_{\text{а}})}{\eta_{\text{к}} \eta_{\text{п}}} \quad (4)$$

где Q — подача (производительность) компрессора, м³/с;

$A_{\text{и}}$ и $A_{\text{а}}$ — соответственно изотермическая и адиабатическая работа сжатия 1 м³ газа до давления P , Дж/м³.

Таблица 1.

Значения величин $A_{и}$ и $A_{а}$ в зависимости от давления воздуха

$P, \text{ ат}^*$	$A_{и}, \text{ Дж/м}^3$	$A_{а}, \text{ Дж/м}^3$
1,5	413	438
2,0	703	785
3,0	1121	1315
4,0	1417	1743
5,0	1641	2090
6,0	1825	2395
7,0	1988	2660
8,0	2120	2915
9,0	2243	3129
10,0	2345	3333

2.1. Расчет мощности двигателя для продолжительного режима

Выбор конкретного типоразмера двигателя ведется на основании **технических требований к электродвигателю:**

- расчетной мощности,
- требуемой частоты вращения,
- режима работы,
- допустимых значений воздействия внешней температуры и влажности,
- вибрационных и ударных воздействий,
- климатических факторов,
- места размещения двигателя при эксплуатации и других возможных факторов.

По таблицам из ряда типоразмеров двигателей принятой серии выбирают типоразмер двигателя **ближайшей большей номинальной мощности** по отношению к рассчитанному значению, учитывающему режим работы электропривода.

Завышение требуемой мощности двигателя ведет к ухудшению его энергетических показателей (КПД и коэффициента мощности) и, как следствие, к:

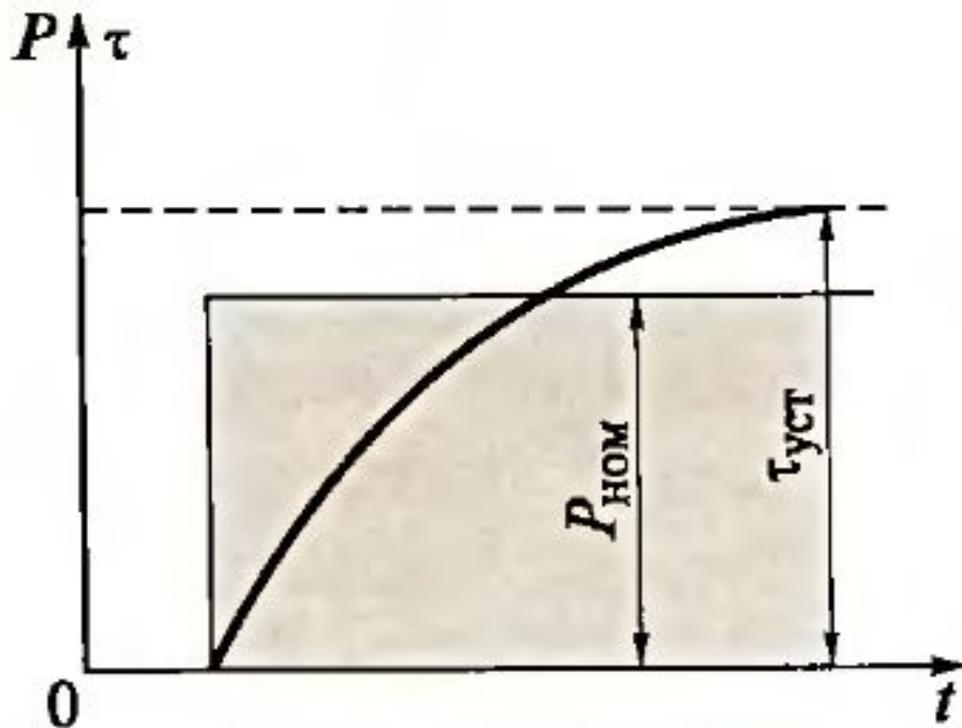
- увеличению непроизводительных потерь энергии,
- удорожанию эксплуатации двигателя,
- возрастанию капитальные затраты.

При занижении требуемой мощности, двигатель будет чрезмерно перегреваться, что приведет к:

- преждевременному выходу из строя,
- непредвиденной остановке рабочего механизма,
- дополнительным расходам на ремонт или замену двигателя.

1. Нагрузка продолжительная неизменная

Рис. 1 Нагрузочная диаграмма продолжительного режима работы с неизменной нагрузкой.



Расчетная мощность двигателя определяется по ф.(1). Затем по каталогу на предварительно выбранную серию двигателей определяют типоразмер двигателя с большим ближайшим значением номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ требуемой частоты вращения $n_{\text{ном}}$.

Пример 1. Определить расчетную мощность двигателя для электропривода центробежного водяного ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) насоса, работающего в продолжительном режиме S1 с неизменной нагрузкой.

Привод нерегулируемый, высота подачи воды $H=40 \text{ м}$, часовая подача насоса $35 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $Q = 35/3600 = 0,0097 \text{ м}^3/\text{с}$, потеря напора в магистрали составляет $\Delta H = 10,5 \text{ м}$; требуемая частота вращения вала двигателя $n_2 = 1450 \pm 20 \text{ об/мин}$, КПД насоса $\eta_{\text{НОМ}} = 0,81$; сочленение вала двигателя с рабочим колесом насоса непосредственное ($\eta_{\text{н}} = 1$).

Условия эксплуатации: климат умеренный, категория размещения 3.

Питающая сеть — трехфазный переменный ток частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Исполнение двигателя по способу монтажа: положение горизонтальное, крепление фланцевое со стороны выступающего конца вала.

Требуется выбрать двигатель

Решение. 1 . Расчетная мощность двигателя (3)

$$P_{\text{расч}} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \rho Q (H + \Delta H)}{\eta_{\text{НОМ}} \eta_{\text{Н}}} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 0,0097 (40 + 10,5)}{0,81 \cdot 1} = 5,93 \text{ кВт.}$$

2. По табл. 2 на асинхронные двигатели серии АИР (основное исполнение) выбираем двигатель **АИР132S4** номинальной мощностью $P_{\text{НОМ}} = 7,5$ кВт; $s_{\text{НОМ}} = 4\%$; $\eta_{\text{НОМ}} = 87,5\%$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,86$; $\lambda_{\text{М}} = 2,5$; $\lambda_{\text{П}} = 2,0$; $\lambda_{\text{I}} = 7,5$; исполнение по способу защиты IP54, исполнение по способу монтажа IM3001.

Скольжение двигателя при фактической (расчетной) нагрузке $P_{\text{расч}} = 5,93$ кВт,

$$s_{\text{расч}} = s_{\text{НОМ}} \frac{P_{\text{расч}}}{P_{\text{НОМ}}} = 0,04 \frac{5,93}{7,5} = 0,03.$$

Следовательно, частота вращения двигателя при расчетной нагрузке $n_{\text{расч}} = n_{\text{НОМ}} (1 - s_{\text{расч}}) = 1500(1 - 0,03) = 1455$ об/мин, что соответствует заданному диапазону частоты вращения насоса $n_2 = 1430 \div 1470$ об/мин.

Таблица 2. Технические данные трехфазных АД серии АИР
основного исполнения

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$S_{\text{ном}}$, %	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{плп}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	J , кг·м ²	Мас-са, кг
<i>Синхронная частота вращения 1500 об/мин</i>										
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0007	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5,0	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5,0	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5,0	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7,0	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17,0
АИР100S4	3,0	82	0,83	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,0087	21,6
АИР100L4	4,0	85	0,84	6,0	2,0	2,2	1,6	7,0	0,011	27,3
АИР112M4	5,5	85,5	0,86	4,5	2,0	2,5	1,6	7,0	0,017	41,0
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2,0	2,5	1,6	7,5	0,028	58

2. Нагрузка продолжительная переменная

Расчет номинальной мощности двигателя выполняют либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин (мощности, момента или тока).

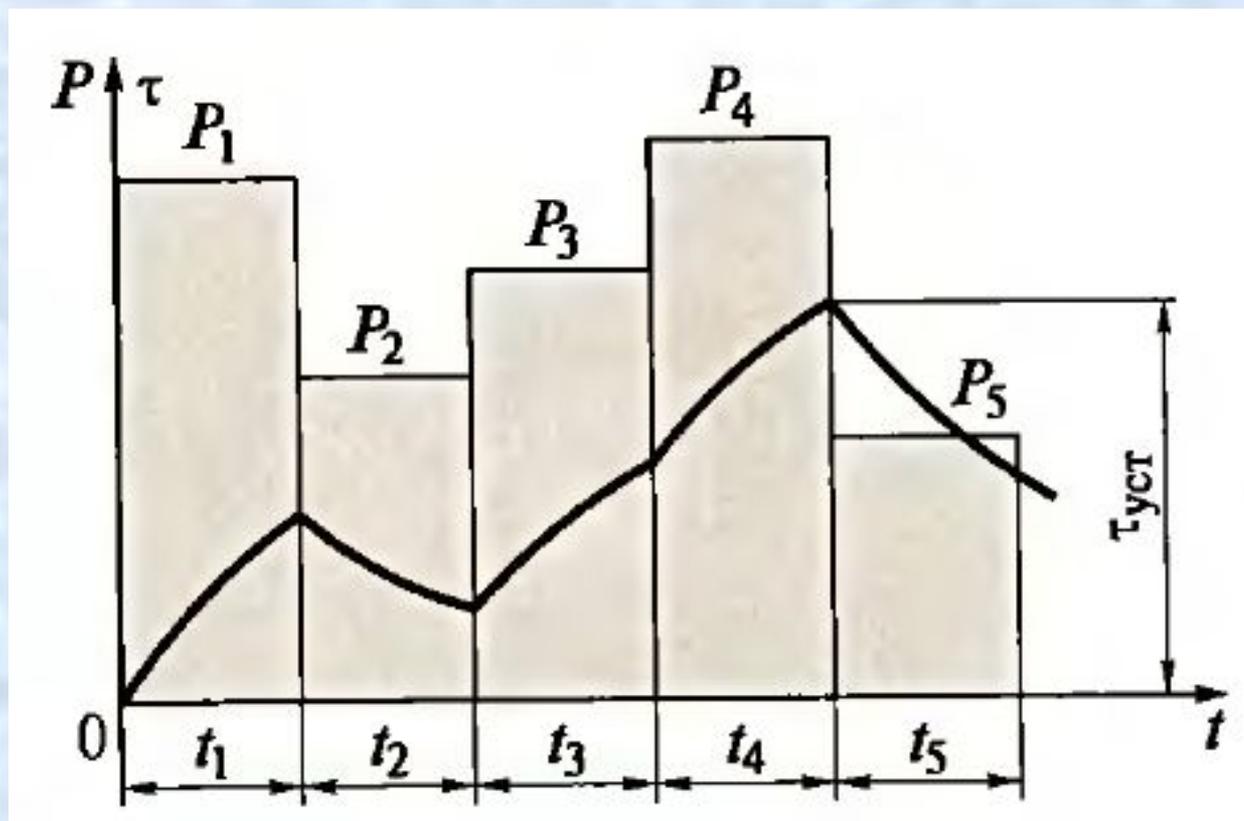


Рис. 2. Нагрузочная диаграмма продолжительного режима работы с переменной нагрузкой

Метод средних потерь. Используя нагрузочную диаграмму, определяют среднее значение мощности, кВт,

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P_x t_x}{\sum t_x}, \quad (5)$$

где $\sum P_x t_x = P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_N t_N;$

$$\sum t_x = t_1 + t_2 + \dots + t_N.$$

Мощность на участках P_x с продолжительностью t_x задается нагрузочной диаграммой. Затем, используя полученное среднее значение мощности, по каталогу выбирают предварительную номинальную мощность двигателя, кВт,

$$P'_{\text{НОМ}} = (1,2 \div 1,3) P_{\text{ср}} \quad (6)$$

и определяют соответствующие этой мощности значение КПД $\eta'_{\text{НОМ}}$ для предварительно выбранного двигателя, а затем рассчитывают потери при номинальной нагрузке, кВт,

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{P'_{\text{НОМ}} (1 - \eta'_{\text{НОМ}})}{\eta'_{\text{НОМ}}}. \quad (7)$$

Определяют потери на участках нагрузочной диаграммы $P_1 P_2 \dots P_N$:

$$\Delta P_x = \frac{P_x(1 - \eta_x)}{\eta_x}. \quad (8)$$

Если в каталоге или справочнике на выбранный типоразмер двигателя приведены график или таблица зависимости КПД от нагрузки, то определение η_x для разных значений мощности P_x не составляет труда. Если же таких данных нет, то полные потери $\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$ для разных значений коэффициента нагрузки по току

$$\beta = \frac{I_x}{I_{\text{НОМ}}},$$

с некоторым приближением можно определить на участках нагрузочной диаграммы по формуле:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{НОМ}} \frac{\gamma + \beta_x^2}{\gamma + 1}, \quad (9)$$

где γ — отношение постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ к переменным $\Delta P_{\text{пер}}$:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}}. \quad (10)$$

Приблизительные значения γ для различных двигателей:

Асинхронные двигатели общего назначения с короткозамкнутым ротором.....	0,5 — 0,7
Асинхронные двигатели крановые, с короткозамкнутым ротором.....	0,4—0,5
с фазным ротором.....	0,6—0,9
Двигатели постоянного тока независимого возбуждения.....	0,5—0,9
ДПТ крановые.....	1,0—1,5

Здесь большие значения γ соответствуют двигателям большей мощности.

Затем в соответствии с нагрузочной диаграммой определяют средние потери двигателя, кВт,

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta P_x t_x}{\sum t_x}, \tag{11}$$

где

$$\sum \Delta P_x t_x = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_N t_N. \tag{12}$$

Полученное значение $\Delta P_{\text{ср}}$ должно быть не больше номинальных потерь предварительно выбранного двигателя $\Delta P_{\text{ном}}$ [ф.(7)]. В этом случае предварительно выбранный типоразмер принимают за окончательный.

Если $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$, то по таблице технических данных этой же серии двигателей выбирают двигатель смежного типоразмера большей мощности и повторяют расчет.

Окончательно выбранный типоразмер двигателя следует проверить на величину начального пускового момента и перегрузочную способность [см.ф.(3)].

Поскольку в принятом типоразмере средние потери не превышают величину номинальных потерь, проверки двигателя на нагрев не требуется.

Пример 2.

Для электропривода токарного станка (вращение шпинделя) необходим трехфазный асинхронный двигатель общего назначения.

Питающая сеть — трехфазный переменный ток частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Исполнение двигателя по способу монтажа: положение вала горизонтальное, крепление фланцевое со стороны выступающего конца вала.

Двигатель нерегулируемый, частота вращения в режиме номинальной нагрузки 1460 ± 15 об/мин.

Режим работы электропривода продолжительный S1 с переменной нагрузкой.

Нагрузочная диаграмма привода представлена на рис. 2; значения мощности P_x (кВт) и времени t_x (мин) на участках этой диаграммы:

$$P_1 = 14; \quad P_2 = 10; \quad P_3 = 12; \quad P_4 = 17; \quad P_5 = 7;$$
$$t_1 = 6; \quad t_2 = 6; \quad t_3 = 4; \quad t_4 = 4; \quad t_5 = 8.$$

Пуск двигателя выполняется без нагрузки.

Требуется выбрать двигатель.

Решение. Решаем задачу методом средних потерь.

1. Среднее значение мощности ф.(5)

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum P_x t_x}{\sum t_x} = \frac{316}{28} = 11,28 \text{ кВт},$$

где

$$\sum P_x t_x = 14 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 12 \cdot 4 + 17 \cdot 4 + 7 \cdot 8 = 316 \text{ кВт/мин};$$

$$\sum t_x = 6 + 6 + 4 + 4 + 8 = 28 \text{ мин.}$$

2. Принимаем предварительно двигатель номинальной мощностью ф.(6)

$$P'_{\text{ном}} = (1,2 - 1,3) P_{\text{ср}} = 1,25 \cdot 11,28 = 14,2 \text{ кВт.}$$

По табл. 6.1 технических данных трехфазных асинхронных двигателей серии 4А (основное исполнение) принимаем двигатель **4А160S4У3** номинальной мощностью $P'_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1465 \text{ об/мин}$;

$$\text{КПД } \eta_{\text{ном}} = 88,5 \%,$$

$$\text{перегрузочная способность } \lambda_{\text{м}} = 2,3;$$

$$\text{кратность пускового момента } \lambda_{\text{п}} = 1,4;$$

$$\text{кратность пускового тока } \lambda_{\text{и}} = 7,0.$$

Таблица 6.1. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии 4А
основного исполнения (IP44; IC0141)

Типоразмеры	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{тп}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	J , кг·м ²
<i>Синхронная частота вращения 1500 об/мин</i>									
4AA50A4Y3	0,06	1389	50,0	0,6	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,29 \cdot 10^{-4}$
4AA50B4Y3	0,09	1370	55,0	0,6	2,2	2,0	1,2	5,0	$0,33 \cdot 10^{-4}$
4AA56A4Y3	0,12	1375	63,0	0,66	2,2	2,0	1,2	5,0	$7,0 \cdot 10^{-4}$
4AA56B4Y3	0,18	1365	64,0	0,64	2,2	2,0	1,2	5,0	$7,88 \cdot 10^{-4}$
4AA63A4Y3	0,25	1380	68,0	0,65	2,2	2,0	1,2	5,0	$12,4 \cdot 10^{-4}$
4AA63B4Y3	0,37	1365	68,0	0,69	2,2	2,0	1,2	5,0	$13,0 \cdot 10^{-4}$
4A71A4Y3	0,55	1390	70,5	0,7	2,2	2,0	1,6	4,5	$13,8 \cdot 10^{-4}$
4A71B4Y3	0,75	1390	72,0	0,73	2,2	2,0	1,6	4,5	$14,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A4Y3	1,1	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	1,6	5,0	$32,3 \cdot 10^{-4}$
4A80B4Y3	1,5	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	1,6	5,0	$33,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L4Y3	2,2	1425	80,0	0,83	2,2	2,0	1,6	6,0	$56,0 \cdot 10^{-4}$
4A100S4Y3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0	$86,8 \cdot 10^{-4}$
4A100L4Y3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0	$1,13 \cdot 10^{-2}$
4A112M4Y3	5,5	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	1,6	7,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A132S4Y3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5	$2,75 \cdot 10^{-2}$
4A132M4Y3	11	1460	84,5	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5	$4,0 \cdot 10^{-2}$
4A160S4Y3	15	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0	$10,3 \cdot 10^{-2}$

3. Коэффициент нагрузки в квадрате β^2 для участков нагрузочной диаграммы:

$$\beta_1^2 = 0,93; \beta_2^2 = 0,66; \beta_3^2 = 0,80; \beta_4^2 = 1,13; \beta_5^2 = 0,47.$$

4. Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения принимаем отношение постоянных потерь к переменным, равным $\gamma=0,5$.

5. Потери при номинальной нагрузке $\phi.(7)$

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}(1 - \eta_{\text{НОМ}})}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{15(1 - 0,885)}{0,885} = 1,95 \text{ кВт.}$$

6. Определяем потери для участков нагрузочной диаграммы $\phi.(9)$

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{НОМ}} \frac{\gamma + \beta_1^2}{\gamma + 1} = 1,95 \frac{0,5 + 0,93}{0,5 + 1} = 1,86 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_2 = 1,95 \frac{0,5 + 0,66}{1,5} = 1,51 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_3 = 1,95 \frac{0,5 + 0,80}{1,5} = 1,69 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_4 = 1,95 \frac{0,5 + 1,13}{1,5} = 2,12 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_5 = 1,95 \frac{0,5 + 0,47}{1,5} = 1,26 \text{ кВт.}$$

7. Средние потери двигателя ф.(11)

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta P_x t_x}{\sum t_x} = \frac{45,54}{28} = 1,63 \text{ кВт,}$$

где $\sum \Delta P_x t_x = 1,86 \cdot 6 + 1,51 \cdot 6 + 1,69 \cdot 4 + 2,12 \cdot 4 + 1,26 \cdot 8 = 45,54$.

8. В связи с тем, что средние потери меньше номинальных потерь ($1,63 < 1,95$), пересчета мощности двигателя не требуется.

9. Наибольшая мощность по нагрузочной диаграмме $P_4 = 17$ кВт, что превышает номинальную мощность выбранного двигателя, поэтому требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Частота вращения на участке $P_4 = 17$ кВт равна

$$n_4 = n_{\text{ном}} \frac{P_{\text{ном}}}{P_4} = 1465 \frac{15}{17} = 1293 \text{ об/мин.}$$

Момент двигателя на четвертом участке нагрузочной диаграммы при $P_4 = 17$ кВт: $M_4 = 9,55 \frac{P_4}{n_4} = 9,55 \frac{17\,000}{1293} = 126 \text{ Н} \cdot \text{м.}$

Момент двигателя при номинальной мощности $P_{\text{ном}} = 15$ кВт:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{15\,000}{1465} = 97,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Таким образом, превышение момента на четвертом участке диаграммы над номинальным составляет $126 / 97,8 = 1,29$.

Перегрузочная способность выбранного двигателя при номинальной нагрузке равна $\lambda_M = 2,3$. Следовательно, на четвертом участке диаграммы перегрузочная способность двигателя уменьшена в $1,29$ раза и составляет $2,3 / 1,29 = 1,78$, т. е. устойчивая работа двигателя обеспечена.

Метод эквивалентных величин.

Эквивалентными считают такие *условные* значения тока, момента или мощности, при которых величина потерь в двигателе, работающем в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, равна потерям мощности при его работе в реальных условиях продолжительного режима с переменной нагрузкой.

Рассмотрим сначала *метод эквивалентного тока*, который основан на замене изменяющегося во времени тока нагрузки двигателя неизменным эквивалентным током,

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (13)$$

Так как эквивалентный ток создает в двигателе такие же потери, что и фактические токи нагрузки, это дает основание по каталогу выбрать типоразмер двигателя, номинальный ток которого равен или несколько больше эквивалентного тока.

Метод эквивалентного тока применим лишь при постоянстве мощности магнитных и механических потерь, а также постоянстве сопротивления обмоток в течение всего рабочего цикла.

Более универсальным является *метод эквивалентного момента*

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (14)$$

Наиболее простым является метод *эквивалентной мощности*, когда расчет эквивалентной мощности ведется непосредственно по нагрузочной диаграмме

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}. \quad (15)$$

Метод может быть применен для двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения и асинхронных двигателей, работающих на естественной механической характеристике, а также синхронных двигателей.

Пример 3.

Для условий примера 2 рассчитать требуемую мощность и выбрать двигатель; задачу решить методом эквивалентной мощности.

Решение. Эквивалентная мощность

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{14^2 \cdot 6 + 10^2 \cdot 6 + 12^2 \cdot 4 + 17^2 \cdot 4 + 7^2 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8}} = 11,8 \text{ кВт.} \quad (15)$$

По табл. технических данных трехфазных асинхронных двигателей серии 4А (основное исполнение) выбираем двигатель с ближайшей большей номинальной мощностью 15 кВт, типоразмер **4А160S4У3** такой же, что и в примере 2.

Расчет требуемой мощности двигателя методом эквивалентных величин менее трудоемок по сравнению с методом средних потерь, но уступает ему в точности.

2.2. Расчет мощности двигателя для кратковременного режима

Задача расчета сводится к определению мощности двигателя $P'_{\text{ном.кр}}$, способного выдержать перегрузку $P_{\text{кр}}$, работая в кратковременном режиме в течение $t_{\text{кр}}$ (см. рис. 3).

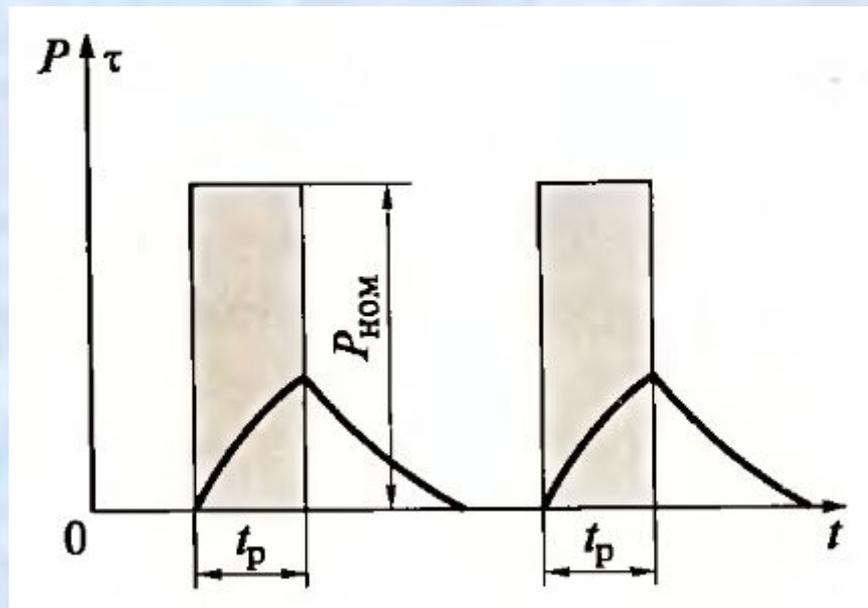


Рис. 3. Нагрузочная диаграмма кратковременного режима работы.

При этом перегрев двигателя не должен превысить значения $\tau_{\text{уст}}$, соответствующего продолжительному режиму работы этого двигателя с номинальной нагрузкой $P_{\text{ном}}$ (см. рис. 1).

В этом случае мощность $P_{кр}$ определяют методом средних потерь.

Коэффициент механической перегрузки по мощности определяют по графику $p_m = f(t^*)$ (рис. 4, б),

где $t^* = t_p / T_n$ — относительное значение времени работы кратковременного режима ($t_p = t_1 + t_2$);

T_n — постоянная времени нагревания.

Установлено, что при $t^* < 0,35$ нагрузка двигателя в кратковременном режиме $P_{кр}$ превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{ном}$ в 2,5 раза и более. При этом перегрузочная способность двигателя обычно не удовлетворяет требованиям электропривода. Поэтому при $t^* \leq 0,35$ двигатель выбирают по требуемой для кратковременного режима перегрузочной способности двигателя λ_m .

Пример 4.

Для электропривода заслонки трубопровода требуется трехфазный асинхронный двигатель с частотой вращения $n_2 = 930 \pm 20$ об/мин. Режим работы кратковременный $t_p = 15$ мин, статический момент сопротивления на валу двигателя реактивный $M_c = 70$ Н·м; двигатель должен быть закрытого исполнения, способ монтажа IM1001, климатические условия и место размещения УЗ.

Решение.

1. Требуемая мощность двигателя

$$P_{кр} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot M_c \cdot n_2 = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 930 = 6,84 \text{ кВт.}$$

2. Выбираем двигатель серии 4А (основное исполнение), степень защиты IP44; постоянная нагревания $T_H = 30$ мин, относительное значение времени рабочего цикла

$$t^* = t_p / T_H = 15 / 30 = 0,5$$

3. По графику рис. 4, б определяем коэффициент механической перегрузки $p_m = 2,1$;

мощность двигателя продолжительного режима, используемого в кратковременном режиме ϕ .(16)

$$P'_{\text{ном.кр}} = P_{\text{кр}} / p_m = 6,84 / 2,1 = 3,25 \text{ кВт.}$$

4. По каталогу двигателей серии 4А (основное исполнение) принимаем двигатель типа **4А112МВ6УЗ** номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 4,0$ кВт, номинальным скольжением 5,1 %, перегрузочной способностью 2,2; кратность пускового момента 2.

5. Учитывая перегрузку двигателя, определяем частоту вращения при кратковременной нагрузке $P_{\text{кр}} = 7,0$ кВт

$$n'_{\text{ном}} = n_1 - P_{\text{кр}} \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} = 1000 - 6,84 \frac{1000 - 949}{4,0} = 913 \text{ об/мин.}$$

где $n_{\text{ном}}$ — частота вращения двигателя в продолжительном номинальном режиме

$$n_{\text{ном}} = 1000(1 - 0,051) = 949 \text{ об/мин.}$$

Типоразмеры	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{тир}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	J , кг·м ²
<i>Синхронная частота вращения 1000 об/мин</i>									
4A63A6У3	0,18	885	56,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$17,4 \cdot 10^{-4}$
4A63B6У3	0,25	890	59,0	0,62	2,2	2,2	1,5	3,0	$19,0 \cdot 10^{-4}$
4A71A6У3	0,37	910	64,5	0,69	2,2	2,0	1,8	4,0	$19,3 \cdot 10^{-4}$
4A71B6У3	0,55	900	67,5	0,71	2,2	2,0	1,8	4,0	$20,3 \cdot 10^{-4}$
4A80A6У3	0,75	915	69,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46,0 \cdot 10^{-4}$
4A80B6У3	1,10	920	74,0	0,74	2,2	2,0	1,6	4,0	$46,3 \cdot 10^{-4}$
4A90L6У3	1,50	935	75,0	0,74	2,2	2,0	1,7	4,5	$73,5 \cdot 10^{-4}$
4A100L6У3	2,20	950	81,0	0,73	2,2	2,0	1,6	5,0	$1,31 \cdot 10^{-2}$
4A112MA6У3	3,0	955	81,0	0,76	2,5	2,0	1,8	6,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A112MB6У3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	1,8	6,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$

6. Момент на валу двигателя, соответствующий кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт и частоте вращения $n_{кр} = 913$ об/мин,

$$M_{кр} = 9,55 \cdot 10^3 \frac{6,84}{913} = 71,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т. е. момент на валу двигателя при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт превышает заданное значение статического нагрузочного момента, $M_{кр} > M_c$.

7. Номинальный вращающий момент двигателя в продолжительном режиме

$$M_{НОМ} = 9,55 \cdot 10^3 \frac{P_{НОМ}}{n_{НОМ}} = 9,55 \cdot 10^3 \frac{4,0}{949} = 40,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Максимальный момент двигателя

$$M_{\max} = 40,2 \cdot 2,2 = 88,44 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Действительная перегрузочная способность двигателя

$$\frac{M_{\max}}{M_c} = \frac{88,44}{70} = 1,26.$$

При возможном уменьшении напряжения сети на 5% перегрузочная способность составит $1,26 \cdot 0,95^2 = 1,14$.

10. Пусковой момент двигателя $M_{\text{п}} = 40,2 \cdot 2 = 80,4$ Н·м, что превышает статический момент $M_c = 70$ Н·м. Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по пусковому моменту и перегрузочной способности.

11. Проверка двигателя по минимальному моменту для выбранного двигателя кратность минимального момента $M_{\min}/M_{\text{НОМ}} = 1,8$, следовательно,
 $M_{\min} = 1,8 \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,8 \cdot 40,2 = 72,4$ Н·м, что превышает статический момент нагрузки $M_c = 70$ Н·м.

2.3. Расчет мощности двигателей при повторно-кратковременном режиме работы

В общем случае каждый период работы t_p нагрузочной диаграммы повторно-кратковременного режима (ПКР) может иметь несколько ступеней (рис.5). Для приведения такой диаграммы к виду рис.6 по ф.(15) рассчитывают эквивалентную по нагреву мощность одного цикла (без учета паузы $t_{п}$).

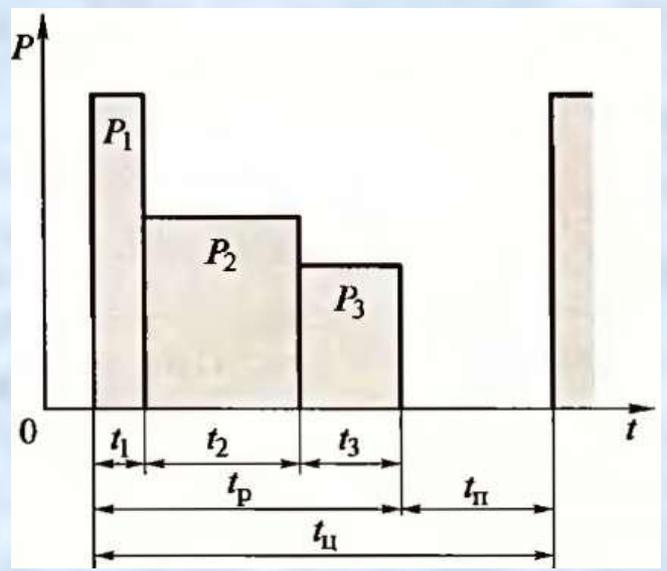


Рис. 5. Трехступенчатая нагрузочная диаграмма ПКР

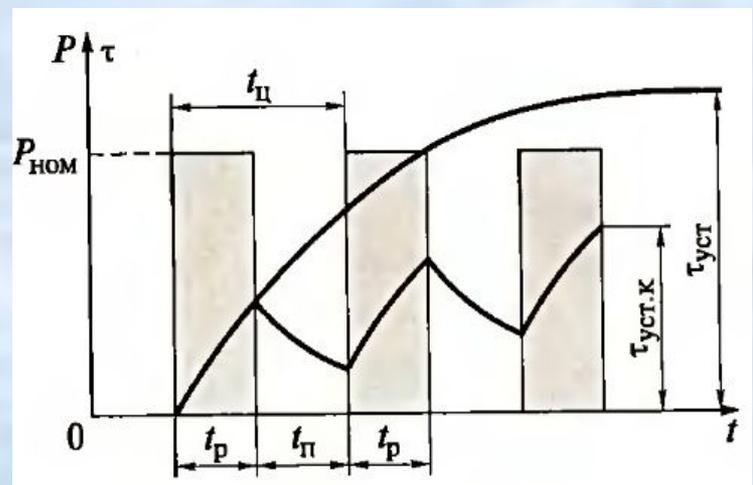


Рис. 6. Нагрузочная диаграмма ПКР

Расчетное значение относительной продолжительности включения

$$ПВ' = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100, \quad (17)$$

где $t_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла; $t_{\text{ц}} = t_p + t_{\text{п}}$.

Для двигателей с самовентиляцией, у которых эффективность охлаждения зависит от частоты вращения, при определении расчетного значения продолжительности включения ПВ' необходимо учитывать ухудшение охлаждения при пуске и во время паузы $t_{\text{п}}$ (остановки) введением коэффициентов α и β при расчете продолжительности цикла:

$$t_{\text{ц}} = \alpha t_{\text{пуск}} + t_p + \beta t_{\text{п}}. \quad (18)$$

При пуске, торможении и остановке:

для асинхронных двигателей $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,50$;

для двигателей постоянного тока $\alpha = 0,75$; $\beta = 0,50$.

Если $t_{\text{пуск}}$ и $t_{\text{торм}}$ не выделены на нагрузочной диаграмме, продолжительность цикла определяют по формуле

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta t_{\text{п}}$$

При $PВ' < 10\%$ расчет мощности ведут как для кратковременного режима работы, а если $PВ' > 60\%$ или продолжительность цикла $t_{ц} > 10$ мин, расчет мощности двигателя ведут как для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой.

Если $10\% \leq PВ' \leq 60\%$, то эквивалентную мощность $P_{эк}$ пересчитывают на номинальную мощность повторно-кратковременного режима $P_{пкр}$, соответствующую ближайшему из номинальных значений $PВ = 15; 25; 40$ или 60% ,

$$P_{пкр} = P_{эк} \sqrt{\frac{PВ'}{PВ}} \quad (19)$$

По полученным значениям $P_{пкр}$ и $PВ$ выбирают двигатель постоянного или переменного тока серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме.

При необходимости выбора мощности двигателя для других значений $PВ_x$ следует воспользоваться формулой

$$P_x = P_{40} \sqrt{\frac{40}{PВ_x}} \quad (20)$$

После выбора двигателя по каталогу и проверки его на величину пускового момента и перегрузочную способность определяют число включений в час $h = 3600 / t_{\text{ц}}$,

где $t_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла, с.

Затем сравнивают его с допустимым числом пусков данной серии $h_{\text{доп}}$.

В случае применения в ЭП с ПКР работы двигателей общего назначения, предназначенных для продолжительного режима работы номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, указанная в каталоге, должна быть увеличена до значения $P_{\text{пкр}}$ в соответствии с ПВ:

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{ном}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (21)$$

где

$$k_{\text{р}} = \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}}}. \quad (22)$$

Таблица 7.14. Технические данные асинхронных двигателей для привода лифтов

Типоразмер	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos\varphi_{ном}$	$I_{1ном}$ при 380 В, А	$M_{ном}$, Н·м	$M_{п}/M_{ном}$	$I_{п}/I_{ном}$	$M_{п.мах}/M_{ном}$	$M_{т.мах}/M_{ном}$	$h_{вкл}$	J , кг·м ²	Масса, кг
$2p = 4/16, 1500/375$ об/мин													
5АН160М4/16	3,55	1440	80	0,68	10,0	24	2,7—3,3	6,5	3,1—3,9	—	150	0,06	105
	—	330	—	—	8,0		$\geq 1,9$	2,0	$\geq 1,9$	3,1—3,9			
5АН180S4/16	6,0	1425	84	0,77	13,9	40	2,4—3,1	6,5	3,0—3,5	—	150	0,165	160
	—	330	—	—	12,0		$\geq 1,9$	2,0	$\geq 1,9$	3,0—3,5			
5АН180М4/16	7,5	1425	85	0,78	16,9	50	2,8—3,3	6,5	3,0—3,4	—	150	0,210	180
	—	330	—	—	15,2		$\geq 2,0$	2,0	$> 2,0$	3,0—3,4			
$2p = 4/24, n_1 = 1500/250$ об/мин													
5АН(Ф)200МА4/24	8,0	1410	85	0,89	16,0	54	2,4—3,0	6,5	2,6—3,1	—	$\frac{150^*}{200}$	0,55	$\frac{255^*}{267}$
	—	215	—	—	12,0		$\geq 1,9$	—	$\geq 1,9$	2,6—3,1			
5АН(Ф)200МВ4/24	12,0	1410	82,5	0,91	24,0	81	2,5—2,8	6,5	2,6—3,1	—	$\frac{150^*}{200}$	0,55	$\frac{255^*}{267}$
	—	210	—	—	19,5		≥ 2	2,6—3,1					
$2p = 6/24, n_1 = 1000/250$ об/мин													
АИН180М6/24	4,5	910	81	0,75	11,2	47	2,5—3,0	5	2,8—3,2	—	150	0,21	182
	—	205	—	—	19,5	—	$\geq 1,8$	—	$\geq 1,8$	2,5—3,0			
$2p = 6/18, n_1 = 1000/333,3$ об/мин													
5АН160S6/18	3,0	960	70	0,54	12,0	30	2,7—3,2	4,6	3,0—3,7		120	0,12	110
	—	293	—	—	13,0	—	$\geq 2,1$	—	$\geq 2,1$				

Примечание. В числителе указано допустимое количество пусков в 1 ч и масса двигателей с самовентиляцией, а в знаменателе — с независимой вентиляцией.

Пример 5. Для электропривода подъемного механизма необходимо рассчитать мощность двигателя методом эквивалентного момента и выбрать трехфазный АД с КЗ ротором серии МТКН для повторно-кратковременного режима работы S3 в соответствии с нагрузочной диаграммой, аналогичной диаграмме рис. 5, где $M_1 = 327 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_2 = 205 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_3 = 164 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $t_n = 120 \text{ с}$; $t_1 = 4 \text{ с}$; $t_2 = 8 \text{ с}$; $t_3 = 15 \text{ с}$; частота вращения $700 \pm 10 \text{ об/мин}$; пуск двигателя под нагрузкой.

Решение. 1. Эквивалентный момент (ф.14)

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{327^2 \cdot 4 + 205^2 \cdot 8 + 164^2 \cdot 15}{4 + 8 + 15}} = 208 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Эквивалентная мощность двигателя

$$P_{\text{эк}} = 0,105 \cdot M_{\text{эк}} \cdot n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 208 \cdot 700 = 15\,288 \text{ Вт} = 15,3 \text{ кВт}.$$

3. Продолжительность цикла

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta \cdot t_n = 27 + 0,5 \cdot 120 = 87 \text{ с}.$$

3. Расчетное значение ПВ' (ф.17)

$$\text{ПВ}' = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100 = \frac{27}{87} 100 = 31 \text{ \%}.$$

4. Мощность двигателя при номинальном ПВ = 40% (ф.19)

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}'}{40}} = 15,3 \sqrt{\frac{31}{40}} = 13,5 \text{ кВт.}$$

5. По табл. 7.4 выбираем типоразмер **МТКН-411-8** с номин. данными: $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$ при ПВ = 40 %; 220/380 В;
 $n_{\text{ном}} = 695 \text{ об/мин}$; $n_1 = 750 \text{ об/мин}$.

Номинальный, максимальный и пусковой моменты на валу двигателя: $M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 15000 / 695 = 206 \text{ Н} \cdot \text{м}$
 $M_{\text{max}} = 657 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{п}} = 638 \text{ Н} \cdot \text{м}$

6. Частота вращения на ступени диаграммы $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$:

$$n = n_1 - \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} (n_1 - n_{\text{ном}}) = 750 - \frac{327}{206} (750 - 695) = 663 \text{ об/мин.}$$

7. Наибольший момент на валу двигателя $M_1 = M_{\text{наиб}} = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$,
 т. е. $M_{\text{наиб}} < M_{\text{п}}$.

8. Перегрузочная способность двигателя $\lambda_{\text{м}} = 657 / 327 = 2,01$.

Таким образом, выбранный двигатель по пусковому моменту и перегрузочной способности удовлетворяет заданным условиям.

Таблица 7.4. Технические данные металлургических двигателей серии МТКН с короткозамкнутым ротором (380/220, 415/240, 400 и 500 В; 50 Гц)

Типоразмер	Мощность на валу, кВт, при						$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, при 380 В, А	$\cos \varphi_{ном}$	$\eta_{ном}$, %	M_{max} , Н·м	$M_{п}$, Н·м	$I_{п}$, при 380 В, А	GD^2 , кг/м ²	Мас- са, кг	n_{max} , об/мин
	ПВ = = 25 %	ПВ = = 40 %	ПВ = = 60 %	ПВ = = 100 %	30 мин.	60 мин.										
МТКН411-6	27	22	18	14	22	18	915	61,0	0,83	81,0	853	785	315	1,9	255	2500
							935	51,0	0,79	82,5						
							950	45,5	0,73	82,5						
							960	40,0	0,65	81,5						
МТКН412-6	36	30	25	18	30	25	920	81,0	0,82	82,5	1128	1079	460	2,55	315	1900
							940	70,0	0,78	83,5						
							950	62,5	0,73	83,0						
							965	54,0	0,62	81,5						
МТКН311-8	9,0	7,5	6,0	4,5	7,5	6,0	670	24,0	0,77	74,0	324	314	95	1,1	155	1900
							690	21,8	0,71	73,5						
							705	19,9	0,62	73,5						
							715	18,2	0,51	73,0						
МТКН312-9	13	11	8,2	6,0	11	8,2	690	34,8	0,74	77,0	500	461	150	1,55	195	1900
							700	32,0	0,68	76,5						
							710	27,7	0,59	76,0						
							720	26,0	0,47	75,0						
<u>МТКН411-8</u>	18	15	13	10	15	13	680	45,0	0,77	78,5	657	638	185	2,15	255	1900
							695	40,0	0,71	80,0						
							705	36,5	0,67	81,0						
							715	33,0	0,58	79,5						
МТКН412-8	26	22	18	13	22	18	690	66	0,75	80,0	981	932	295	3,0	315	1900
							700	60	0,69	80,5						
							710	54	0,63	80,0						
							720	49	0,52	77,5						