



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Башкирский государственный аграрный университет»

Приложение к ОПОП ВО

Методические указания к  
практическим занятиям

Кафедра электрических машин  
и электрооборудования

## **Б1.В.ДВ.02.02 ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Методические указания к практическим занятиям**

Направление подготовки

**13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

Профиль подготовки

**Электроснабжение**

Квалификация (степень) выпускника

**Бакалавр**

Уфа 2024

УДК 363/1  
ББК 40.76  
Э46

Рекомендовано к изданию методической комиссией энергетического факультета «21» марта 2024 г. (протокол № 8).

Составители: канд. техн. наук, доцент Ярмухаметов У.Р.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов Ахметшин А.Т.

Ответственный за выпуск: и.о. зав. кафедрой электрических машин и электрооборудования Акчурин С.В.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Расчёт и построение естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик ДПТ независимого и последовательного возбуждения. Практическое занятие № 1	4
2 Расчёт и построение естественных механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей. Практическое занятие № 2	17
3 Расчёт мощности и выбор двигателя для продолжительного режима работы, сравнительный анализ применения различных методов расчёта. Практическое занятие № 3	22
4 Расчёт мощности и выбор двигателя для кратковременного и повторно-кратковременного режима работы. Практическое занятие № 4	28
5 Изучение аппаратуры управления и защиты электроприводов. Практическое занятие № 5	33
6 Выбор электропривода и составление схем автоматического управления насосными установками для водоснабжения и орошения. Практическое занятие № 6	43
7 Определение возможности пуска асинхронных короткозамкнутых электроприводов от источников ограниченной мощности и выработка мероприятий с анализом вариантов. Практическое занятие № 7	50
Библиографический список	54
Приложения	55

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электропривод» предназначены для студентов очной и заочной форм обучения и призваны способствовать освоению рабочей программы по указанной дисциплине.

Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию рабочей программы дисциплины Б1.В.ДВ.02.02 «Электропривод» для направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника профиля подготовки «Электроснабжение».

Содержание методических указаний направлено на углубленное изучение студентами наиболее важных модулей теоретического курса и включает рекомендуемую последовательность при выполнении работ, а также необходимые нормативные и информационные данные.

### **1 РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДПТ НЕЗАВИСИМОГО И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

#### Практическое занятие № 1

#### **1.1 Основные формулы, характеризующие работу ДПТ и используемые при построении механических характеристик**

Уравнение электрического равновесия цепи якоря двигателя постоянного тока (далее – ДПТ) записывают следующим образом:

$$U = E + IR = k\Phi\omega + I(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}), \quad (1.1)$$

где  $U$  - напряжение, приложенное к цепи ДПТ, В;

$E$  - ЭДС, наведенная в обмотке якоря ДПТ, В;

$I$  - ток в цепи якоря ДПТ, А;

$R$  - общее сопротивление цепи якоря, Ом;

$k$  - безразмерный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя;

$\Phi$  - магнитный поток ДПТ, Вб;

$\omega$  - угловая скорость вращения якоря ДПТ (далее – скорость), рад/с;

$R_{\text{я}}$  – внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ, состоящее из сопротивлений последовательно соединенных обмоток якоря  $r_{\text{ОЯ}}$ , дополнительных полюсов  $r_{\text{ДП}}$  и компенсационной  $r_{\text{КО}}$ , щеточного контакта  $r_{\text{Щ}}$ , а также сопротивления последовательной обмотки возбуждения  $r_{\text{ОВ}}$  (для ДПТ последовательного возбуждения);

$R_{\text{д}}$  - сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно в цепь якоря, Ом.

Внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ с независимым возбуждением (НВ) и ДПТ последовательного возбуждения (ПВ) рассчитывается соответственно по формулам:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{н}}) \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = 0,5(1 - \eta_{\text{н}})R_{\text{н}}, \quad (1.2)$$

$$R_{\text{я}} \approx 0,75(1 - \eta_{\text{н}})R_{\text{н}}, \quad (1.3)$$

где  $\eta_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{н}}$ ,  $I_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{н}}$  – соответственно, номинальные КПД, напряжение, ток и сопротивление.

Электродвижущая сила (далее – ЭДС), наведенная в обмотке ДПТ при номинальной скорости  $w_{\text{н}}$  и номинальном магнитном потоке  $\Phi_{\text{н}}$ ,

$$E_{\text{н}} = C_{\text{н}}w_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}}R_{\text{я}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}}, \quad (1.4)$$

где  $C_{\text{н}}$  - коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью, а также между электромагнитным моментом и током якоря в ДПТ при неизменном магнитном потоке возбуждения  $\Phi_{\text{н}}$ .

Номинальный электромагнитный вращающий момент ДПТ

$$M_{\text{эН}} = k\Phi_{\text{н}}I_{\text{н}} = C_{\text{н}}I_{\text{н}} = M_{\text{н}} + M_{\text{хх}}, \quad (1.5)$$

где  $M_{\text{н}}$  - номинальный вращающий момент на валу электродвигателя, Н·м;

$M_{\text{хх}}$  - момент холостого хода (момент потерь) двигателя, Н·м (этот момент мал относительно момента на валу двигателя, поэтому в приближенных расчетах им можно пренебречь).

Уравнение электромеханической характеристики ДПТ НВ [зависимость  $w = f(I)$ ] записывают следующим образом:

$$w = \frac{(U - IR)}{C} = w_0 - \Delta w, \quad (1.6)$$

где  $w_0$  - скорость якоря при идеальном холостом ходе ДПТ, рад/с;

$\Delta w$  - статическое падение скорости якоря, рад/с.

Уравнение механической характеристики ДПТ НВ [зависимость  $w = f(M)$ ] записывают следующим образом:

$$w = \frac{U}{C} - \frac{MR}{C^2} = w_0 - \Delta w, \quad (1.7)$$

где  $M$  - вращающий момент на валу двигателя, Н·м.

Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети при номинальной нагрузке,

$$P_{\text{ЭН}} = U_{\text{H}} I_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} = \frac{M_{\text{H}} w_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}}, \quad (1.8)$$

где  $P_{\text{H}}$  - номинальная механическая мощность на валу двигателя, Вт;

$w_{\text{H}} = \pi \cdot n_{\text{H}}/30$  - номинальная скорость якоря, рад/с;

$n_{\text{H}}$  - номинальная частота вращения двигателя, мин<sup>-1</sup>.

Номинальный вращающий момент на валу двигателя

$$M_{\text{H}} = P_{\text{H}} \cdot 10^3 / w_{\text{H}}. \quad (1.9)$$

Скорость идеального холостого хода

$$w_0 = \frac{U_{\text{H}}}{C_{\text{H}}} = \frac{w_{\text{H}} U_{\text{H}}}{U_{\text{H}} - I_{\text{H}} R_{\text{я}}} = \frac{w_{\text{H}} U_{\text{H}}}{E_{\text{H}}}. \quad (1.10)$$

Сопротивления добавочных резисторов, включаемых в цепь якоря ДПТ для ограничения тока при пуске, рекуперативном и динамическом торможении, а также при торможении противовключением рассчитывают по формулам:

$$R_{\text{ДОБ п}} = \frac{U_{\text{с}}}{I_{\text{п}}} - R_{\text{я}}; \quad (1.11)$$

$$R_{\text{ДОБ рт}} = \frac{(E_{\text{я}} - U_{\text{с}})}{I_{\text{т}}} - R_{\text{я}}; \quad (1.12)$$

$$R_{\text{ДОБ дт}} = \frac{E_{\text{я}}}{I_{\text{т}}} - R_{\text{я}}; \quad (1.13)$$

$$R_{\text{ДОБ тп}} = \frac{(U_{\text{с}} + E_{\text{я}})}{I_{\text{т}}} - R_{\text{я}}; \quad (1.14)$$

где  $I_{\text{п}}$  и  $I_{\text{т}}$  - допустимые (предельные) начальные значения тока при пуске и торможении, А;

$U_{\text{с}}$ ,  $E_{\text{я}}$  - напряжение сети и ЭДС якоря, В.

Полные потери мощности в двигателе при  $P = P_{\text{H}}$

$$\Delta P_{\text{H}} = P_{\text{ЭН}} - P_{\text{H}} = P_{\text{H}} \left( \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} \right); \quad (1.15)$$

Угловая скорость вращения якоря ДПТ ПВ на реостатной характеристике при фиксированном значении тока  $I_i$

$$w_{\text{H}i} = w_{\text{e}i} \frac{U_{\text{H}} - I_i (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{U_{\text{H}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}, \quad (1.16)$$

где  $w_{ei}$  - угловая скорость на естественной электромеханической характеристике при фиксированном токе, рад/с.

Физические величины, выраженные в относительных единицах:  
вращающий момент

$$M_* = \frac{M}{M_H}; \quad (1.17)$$

магнитный поток

$$\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_H}; \quad (1.18)$$

напряжение

$$U_* = \frac{U}{U_H}; \quad (1.19)$$

перепад скорости

$$\delta = \frac{(w_0 - w)}{w_0}; \quad (1.20)$$

скорость якоря ДПТ НВ

$$w_* = \frac{w}{w_0}; \quad (1.21)$$

скорость якоря ДПТ ПВ

$$w_* = \frac{w}{w_H}; \quad (1.22)$$

ток

$$I_* = \frac{I}{I_H} \text{ при } \Phi = \Phi_H. \quad (1.23)$$

Жесткость естественной механической характеристики:

$$\beta = (M_{*0} - M_{*H}) / (w_{*0} - w_{*H}) \quad (1.24)$$

где  $M_{*0}$  – момент, соответствующий скорости идеального холостого хода,  $M_{*0} = 0$ .

## 1.2 Расчет и построение механической и электромеханической характеристик ДПТ независимого возбуждения по каталожным данным

*Пример.* Для ДПТ НВ, используя его паспортные (номинальные) данные:  $P_H = 2,5$  кВт;  $U_H = 110$  В;  $n_H = 1000$  мин<sup>-1</sup>;  $\eta_H = 72\%$ , определить величины,

характеризующие его работу в номинальном режиме и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики.

*Решение:*

1. Номинальный ток двигателя

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{U_H \eta_H} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{110 \cdot 0,72} = 31,6 \text{ А.}$$

2. Номинальное сопротивление двигателя

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

3. Внутреннее сопротивление цепи якоря

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_H} = 0,5R_H(1 - \eta_H) = 0,5 \cdot 3,48(1 - 0,72) = 0,487 \text{ Ом.}$$

4. Падение напряжения в цепи якоря

$$\Delta U_{\text{я}} = I_H R_{\text{я}} = 31,6 \cdot 0,487 = 15,4 \text{ В.}$$

5. Электродвижущая сила (далее – ЭДС), наведенная в обмотке ДПТ НВ при номинальной скорости  $w_H$  и номинальном магнитном потоке  $\Phi_H$ ,

$$E_H = U_H - \Delta U_{\text{я}} = 110 - 15,4 = 94,6 \text{ В.}$$

6. Номинальная скорость якоря

$$w_H = \pi \cdot \frac{n_H}{30} = 0,105 \cdot n_H = 0,105 \cdot 1000 = 105 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

7. Номинальный вращающий момент на валу двигателя

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{w_H} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{105} = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

8. Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети при номинальной нагрузке,

$$P_{\text{ЭН}} = U_H I_H = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{M_H w_H}{\eta_H} = \frac{2,5}{0,72} = 3,47 \text{ кВт.}$$

9. Полные потери мощности в двигателе при  $P = P_H$

$$\Delta P_H = P_{\text{эH}} - P_H = P_H \left( \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) = 2,5 \left( \frac{1 - 0,72}{0,72} \right) = 0,97 \text{ кВт.}$$

10. Скорость идеального холостого хода при номинальном напряжении

$$w_0 = \frac{w_H U_H}{U_H - I_H R_{\text{я}}} = \frac{w_H U_H}{E_H} = \frac{105 \cdot 110}{94,6} = 122 \text{ рад/с.}$$

11. Коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью

$$C_H = \frac{E_H}{w_H} = \frac{94,6}{105} = 0,9 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

12. Номинальный электромагнитный вращающий момент

$$M_{\text{эH}} = C_H \cdot I_H = 0,9 \cdot 31,6 = 28,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

13. Перепад скорости

$$\delta = \frac{(w_0 - w_H)}{w_0} = \frac{(122 - 105)}{122} = 0,14.$$

14. Момент холостого хода

$$M_{\text{xx}} = M_{\text{эH}} - M_H = 28,4 - 23,8 = 4,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

17. Скорость реального холостого хода

$$w_{\text{xx}} = \frac{U_H}{C_H} - \frac{M_{\text{xx}} R_{\text{я}}}{C_H^2} = \frac{110}{0,9} - \frac{4,6 \cdot 0,487}{0,9^2} = 119,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

18. Номинальная скорость якоря в относительных единицах

$$w_* = \frac{w_H}{w_0} = \frac{105}{122} = 0,86.$$

19. Жесткость естественной механической характеристики

$$\beta = \frac{(M_{*0} - M_{*H})}{(w_{*0} - w_{*H})} = \frac{(0 - 1)}{(1 - 0,86)} = -7,14.$$

Для построения естественных механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ (рисунок 1.1), которые представляют собой прямые линии достаточно определить координаты 2 точек:

- 1)  $w = w_0; M = 0, I = 0$
- 2)  $w = w_H; M = M_H, I = I_H.$

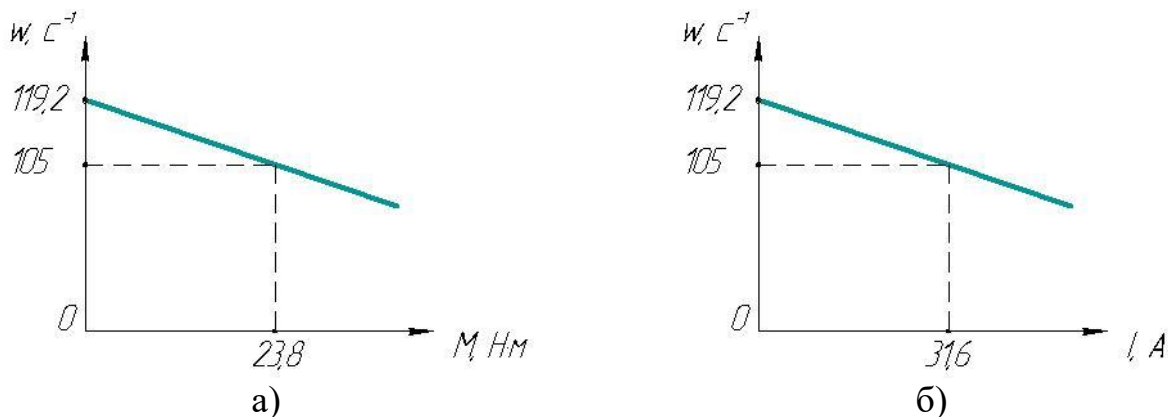


Рисунок 1.1 Естественные механическая а) и электромеханическая б) характеристики ДПТ НВ

### 1.3 Расчет и построение естественных механических и электромеханических характеристик ДПТ последовательного возбуждения по каталожным данным

*Пример.* Для ДПТ последовательного возбуждения, используя его паспортные (номинальные) данные:  $P_H = 3,3$  кВт;  $U_H = 40$  В;  $I_H = 96$  А;  $n_H = 1250$  мин<sup>-1</sup>, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики.

*Решение:*

1. Коэффициент полезного действия

$$\eta_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{I_H U_H} = \frac{3,3 \cdot 10^3}{96 \cdot 40} = 0,86.$$

2. Номинальная скорость якоря

$$w_H = \pi \cdot \frac{n_H}{30} = 0,105 \cdot n_H = 0,105 \cdot 1250 = 131 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Номинальный вращающий момент на валу двигателя

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{w_H} = \frac{3,3 \cdot 10^3}{131} = 25,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}} = \frac{40}{96} = 0,42 \text{ Ом.}$$

5. Внутреннее сопротивление цепи якоря

$$R_{\text{я}} \approx 0,75(1 - \eta_{\text{H}})R_{\text{H}} = 0,75(1 - 0,86)0,42 = 0,04 \text{ Ом.}$$

6. Падение напряжения в цепи якоря

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{H}}R_{\text{я}} = 96 \cdot 0,04 = 3,84 \text{ В.}$$

7. ЭДС двигателя в номинальном режиме

$$E_{\text{H}} = U_{\text{H}} - \Delta U_{\text{я}} = 40 - 3,84 = 36,2 \text{ В.}$$

8. Коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью

$$C_{\text{H}} = \frac{E_{\text{H}}}{w_{\text{H}}} = \frac{36,2}{131} = 0,28 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

9. Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети при номинальной нагрузке,

$$P_{\text{эH}} = \frac{P_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} = \frac{3,3}{0,86} = 3,84 \text{ кВт.}$$

10. Полные потери мощности в двигателе при  $P = P_{\text{H}}$

$$\Delta P_{\text{H}} = P_{\text{H}} \left( \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}} \right) = 3,3 \left( \frac{1 - 0,86}{0,86} \right) = 0,54 \text{ кВт.}$$

Построение механических и электромеханических характеристик ДПТ последовательного возбуждения обычно производят графоаналитическим способом на основании данных каталогов, где приводятся универсальные характеристики  $w_* = f(I_*)$ ,  $M_* = f(I_*)$ , и даны зависимости  $w_* = \frac{w}{w_{\text{H}}}$ ,  $M_* = \frac{M}{M_{\text{H}}}$  в функции относительного тока  $I_* = \frac{I}{I_{\text{H}}}$  (рисунок 1.2).

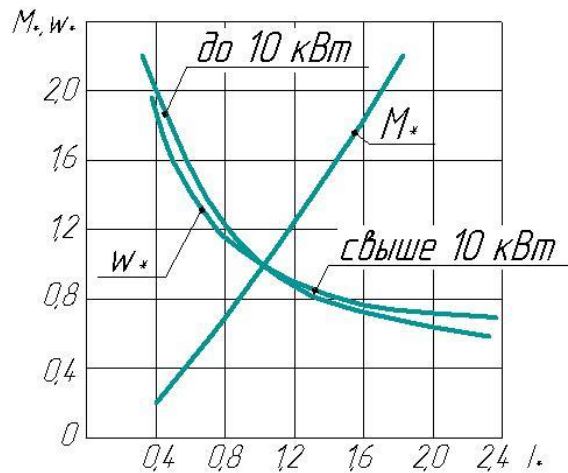


Рисунок 1.2 Универсальные характеристики ДПТ ПВ

С использованием универсальных характеристик заполняется таблица 1.1.

Таблица 1.1 К расчету механических и электромеханических характеристик ДПТ ПВ

$I_*$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
$M_*$	0,24	0,71	1,22	1,84	-
$w_*$	2,0	1,24	0,92	0,73	0,6
$w = w_* \cdot w_H$	262	162	120	95	78
$M = M_* \cdot M_H$	6	18	31	46	-
$I = I_* \cdot I_H$	38,4	76,8	115	154	192

По полученным данным строятся естественные механическая  $w=f(M)$  и электромеханическая  $w=f(I)$  характеристики ДПТ последовательного возбуждения.

#### 1.4 Построение искусственных механических характеристик ДПТ независимого возбуждения

*Пример.* Для ДПТ НВ, рассмотренного в п. 1.2, построить искусственные механические характеристики при:

- напряжении на якоре  $U=0,5U_H$ ;
- сопротивлении цепи якоря  $R=5R_я$ ;
- магнитном потоке  $\Phi=0,8\Phi_H$ ;
- действуют одновременно все условия.

*Решение:*

Для построения искусственных механических характеристик также необходимо знать координаты 2-х точек: идеального холостого хода ( $w_u=w_{0и}$ ;  $M=0$ ) и номинального режима нагрузки ( $w_u=w_H$ ;  $M=M_H$ ).

1. Скорость вращения идеального холостого хода при  $U=0,5U_H$

$$w_{0и1} = \frac{0,5U_H}{C_H} = \frac{0,5 \cdot 110}{0,9} = 61 \text{ рад/с.}$$

Скорость вращения при  $M=M_H$  и  $U=0,5U_H$

$$w_{Hи1} = w_{0и1} - \frac{M_H R_{я}}{C_H^2} = 61 - \frac{23,8 \cdot 0,487}{0,9^2} = 46,7 \text{ рад/с.}$$

На рисунке 1.3 построена искусственная характеристика 2 при  $U=0,5U_H$ .

2. При построении реостатной характеристики координаты точки 1 известны: (122; 0), т.к.  $w_0$  не зависит от сопротивления добавочных резисторов. Скорость вращения  $w_{Hи2}$  при  $M = M_H$  и  $R=5R_{я}$

$$w_{Hи2} = w_0 - \frac{M_H \cdot 5R_{я}}{C_H^2} = 122 - \frac{23,8 \cdot 5 \cdot 0,487}{0,9^2} = 50,4 \text{ рад/с.}$$

На рисунке 1.3 построена искусственная характеристика 3 при  $R=5R_{я}$ .

3. При изменении магнитного потока искусственную механическую характеристику строят по точкам:

- 1)  $w = w_{0и3}; M = 0;$
- 2)  $w = w_{Hи3}; M = M_H.$

$$w_{0и3} = \frac{U_H}{0,8 \cdot C_H} = \frac{110}{0,8 \cdot 0,9} = 153 \text{ рад/с,}$$

$$w_{Hи3} = \frac{U_H}{0,8 \cdot C_H} - \frac{M_H \cdot R_{я}}{(0,8 \cdot C_H)^2} = \frac{110}{0,8 \cdot 0,9} - \frac{23,8 \cdot 0,487}{(0,8 \cdot 0,9)^2} = 130,6 \text{ рад/с.}$$

На рисунке 1.3 построена искусственная характеристика 4 при  $\Phi=0,8\Phi_H$ .

4. При комплексном изменении напряжения, сопротивления и магнитного потока скорость идеального холостого хода равна:

$$w_{0и4} = \frac{0,5 \cdot U_H}{0,8 \cdot C_H} = \frac{0,5 \cdot 110}{0,8 \cdot 0,9} = 76,4 \text{ рад/с.}$$

Скорость при  $M = M_H$

$$w_{Hи3} = w_{0и4} - \frac{M_H \cdot 5R_{я}}{(0,8 \cdot C_H)^2} = 76,4 - \frac{23,8 \cdot 5 \cdot 0,487}{(0,8 \cdot 0,9)^2} = -35,4 \text{ рад/с.}$$

На рисунке 1.3 для этого режима построена искусственная характеристика 5.

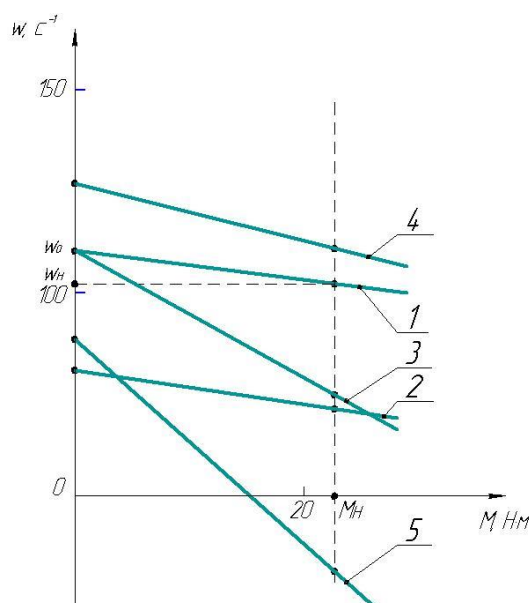


Рисунок 1.3 Искусственные механические характеристики ДПТ НВ

### 1.5 Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** Для ДПТ независимого возбуждения, используя его паспортные данные, приведенные в таблице 1.2, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, построить естественную механическую и электромеханическую характеристики и рассчитать жесткость механической характеристики.

Таблица 1.2 Варианты заданий для построения естественной характеристики ДПТ НВ

№ п/п	$P_{Н2}$ , кВт	$U_{Н2}$ , В	$n_{Н2}$ , мин <sup>-1</sup>	$\eta_{Н2}$ , %
1	2	3	4	5
1	2,8	220	750	66,5
2	4,2	110	950	72
3	5,5	220	1600	80,5
4	7,5	110	2200	83
5	11	220	3000	85,5
6	4,2	220	750	73
7	6	220	1000	79
8	7,5	220	1500	83
9	13	220	2240	87
10	16	220	3150	87
11	10	110	750	77,5
12	14	220	1000	82
13	18,5	220	1500	87
14	25	220	2120	89
15	15	110	750	82
16	20	220	1000	85,5
17	30	220	1500	88,5
18	15	220	500	77,5
19	22	220	750	83,2

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5
20	30	220	1060	85
21	20,8	220	600	82,2
22	37	220	750	83,2
23	45	220	1000	86
24	75	220	1500	89
25	5,5	110	1500	79
26	7,5	220	2120	83,5
27	15	110	750	82
28	10	220	750	79
29	6	110	1000	78
30	4,2	220	750	73

**Задача 2.** Для ДПТ последовательного возбуждения, используя его паспортные данные, приведенные в таблице 1.3, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, построить естественные механическую и электромеханическую характеристики.

Таблица 1.3 Варианты заданий для построения естественной характеристики ДПТ ПВ

№ п/п	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$n_H$ , мин <sup>-1</sup>
1	2	3	4	5
1	0,18	110	3,5	1000
2	0,25	220	1,7	1500
3	0,55	110	7,9	3000
4	0,25	110	4,0	1000
5	0,37	220	2,1	1500
6	0,55	220	3,5	2200
7	0,75	110	10,7	1000
8	0,37	110	4,8	1000
9	0,75	220	5	2200
10	1,1	110	15,2	3000
11	0,18	220	1,6	1000
12	0,25	110	4,1	1500
13	1,5	110	19	1500
14	1,1	110	15,4	1000
15	2,2	220	13,4	3000
16	1,5	220	9,5	2200
17	1,1	220	6,1	1500
18	0,55	110	13,8	1000
19	0,75	110	10,4	1000
20	0,55	220	3,8	750
21	1,5	220	9,7	3000
22	1,1	220	6,7	2200
23	0,75	220	5,1	1500
24	0,55	220	3,9	1000
25	0,37	110	2,7	750
26	1,5	220	9,3	1500

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5
27	1,1	220	7,2	1000
28	0,75	110	11	750
29	1,5	110	26,2	3000
30	1,1	110	19,3	1500

**Задача 3.** Для ДПТ НВ, рассмотренного в задаче 1.1, построить естественную и искусственные механические характеристики при изменении:

- напряжения на якоре  $U$ ;
- сопротивления цепи якоря  $R$ ;
- магнитного потока  $\Phi$ ;
- одновременном изменении вышеперечисленных параметров.

Произвести сравнительную оценку полученных механических характеристик (изменение жесткости механических характеристик и скорости идеального холостого хода, направление регулирования скорости).

Таблица 1.4 Варианты заданий для построения искусственных механических характеристик ДПТ независимого возбуждения

№ п/п	$U$	$R$	$\Phi$
1	2	3	4
1	$0,5U_H$	$5R_{я}$	$0,9\Phi_H$
2	$0,6U_H$	$4R_{я}$	$0,8\Phi_H$
3	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,7\Phi_H$
4	$0,8U_H$	$2R_{я}$	$0,6\Phi_H$
5	$0,9U_H$	$5R_{я}$	$0,5\Phi_H$
6	$0,8U_H$	$4R_{я}$	$0,4\Phi_H$
7	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,9\Phi_H$
8	$0,6U_H$	$2R_{я}$	$0,8\Phi_H$
9	$0,5U_H$	$5R_{я}$	$0,7\Phi_H$
10	$0,6U_H$	$4R_{я}$	$0,6\Phi_H$
11	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,5\Phi_H$
12	$0,8U_H$	$2R_{я}$	$0,4\Phi_H$
13	$0,9U_H$	$5R_{я}$	$0,9\Phi_H$
14	$0,8U_H$	$4R_{я}$	$0,8\Phi_H$
15	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,7\Phi_H$
16	$0,6U_H$	$2R_{я}$	$0,6\Phi_H$
17	$0,5U_H$	$5R_{я}$	$0,5\Phi_H$
18	$0,6U_H$	$4R_{я}$	$0,4\Phi_H$
19	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,9\Phi_H$
20	$0,8U_H$	$2R_{я}$	$0,8\Phi_H$
21	$0,9U_H$	$5R_{я}$	$0,7\Phi_H$
22	$0,8U_H$	$4R_{я}$	$0,6\Phi_H$
23	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,5\Phi_H$
24	$0,6U_H$	$2R_{я}$	$0,4\Phi_H$
25	$0,5U_H$	$5R_{я}$	$0,9\Phi_H$
26	$0,6U_H$	$4R_{я}$	$0,8\Phi_H$
27	$0,7U_H$	$3R_{я}$	$0,7\Phi_H$

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4
28	$0,8U_H$	$2R_{я}$	$0,6\Phi_H$
29	$0,9U_H$	$5R_{я}$	$0,5\Phi_H$
30	$0,8U_H$	$4R_{я}$	$0,4\Phi_H$

### 1.6 Вопросы для самоконтроля

1. Какие типы ДПТ применяются в ЭП?
2. Какова методика построения естественных механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ?
3. Какова методика построения естественных механической и электромеханической характеристик ДПТ ПВ?
4. С какой целью запрещено соединять ДПТ ПВ с рабочей машиной через ременную передачу?
5. Что такое жесткость механической характеристики? Каким образом она определяется?
6. Что представляет собой универсальная характеристика ДПТ ПВ?
7. Назовите основные способы регулирования координат электроприводов с ДПТ НВ.
8. Как влияет величина сопротивления в цепи якоря на жесткость механической характеристики и скорость вращения ДПТ НВ и ДПТ ПВ?
9. Как изменяется жесткость механической характеристики и скорость вращения ДПТ НВ при изменении магнитного потока?
10. Как изменяется жесткость механической характеристики и скорость вращения ДПТ НВ при изменении напряжения в якорной цепи?

## 2 РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Практическое занятие № 2

### 2.1 Основные формулы, характеризующие работу АД и используемые при построении механических характеристик

Частота (синхронная) вращения магнитного поля статора АД

$$n_0 = \frac{60f}{p}; \quad (2.1)$$

где  $f$  – частота питающего напряжения, Гц;  
 $p$  – число пар полюсов.

Угловая скорость вращения магнитного поля статора АД

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (2.2)$$

Скольжение АД

$$s = \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0}, \quad (2.3)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора АД:

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (2.4)$$

Номинальный момент АД вычисляется по формуле (1.9).

Этих данных достаточно для построения рабочего участка механической характеристики АД по двум точкам:

номинальной нагрузки ( $\omega_n; M_{ном}$ ) и идеального холостого хода ( $\omega_0; 0$ ).

Для построения всей механической характеристики расчет продолжают в следующей последовательности.

Критический (максимальный) момент

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_n, \quad (2.5)$$

где  $\mu_{кр}$  - кратность критического (максимального) момента (паспортные данные АД).

Пусковой момент двигателя при  $s = 1$

$$M_{п} = \mu_{п} \cdot M_n, \quad (2.6)$$

где  $\mu_{п}$  - кратность пускового момента (паспортные данные АД).

Пусковой ток двигателя

$$I_{п} = k_i \cdot I_n, \quad (2.7)$$

где  $k_i$  - кратность пускового тока электродвигателя (паспортные данные АД).

Минимальный момент двигателя (значение скольжения, соответствующего минимальному моменту, ориентировочно принимают равным 0,84...0,86)

$$M_{min} = \mu_{min} \cdot M_n, \quad (2.8)$$

где  $\mu_{min}$  - кратность минимального момента.

Критическое скольжение АД

$$s_{кр} = s_{ном} \left[ \mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1} \right]. \quad (2.9)$$

где  $s_{ном}$  - номинальное скольжение.

Текущее значение вращающего момента при заданных величинах определяют по упрощенной формуле Клосса

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (2.10)$$

Для построения электромеханической (скоростной) характеристики АД можно воспользоваться формулой Шубейко

$$I_1 = \sqrt{(I_H^2 - I_0^2) \frac{s \cdot M}{s_{нх} M_H} + I_0^2}, \quad (2.11)$$

где  $I_1$  - ток статора, соответствующий скольжению  $s$  и моменту  $M$ ;

$I_H, M_H$  - номинальные значения тока статора и момента двигателя;

$s_{нх}$  - скольжение на расчетной  $x$ -й характеристике, соответствующей номинальному моменту;

$I_0$  - ток холостого хода АД:

$$I_0 = I_H \left( \sin \varphi_H - \frac{s_H}{s_K} \cos \varphi_H \right). \quad (2.12)$$

Потери мощности в цепи ротора АД

$$\Delta P = P_э - P_{мх} = M w_0 - M w = M w_0 s, \quad (2.13)$$

где  $P_э$  - электромагнитная мощность двигателя, Вт;

$P_{мх}$  - механическая мощность на валу ротора, Вт.

Частота тока ротора

$$f_1 = f \cdot s. \quad (2.14)$$

## 2.2 Расчет и построение естественной механической характеристики АД по каталожным данным

*Пример.* Рассчитать и построить механическую и электромеханическую характеристики АД с короткозамкнутым ротором типа АИР112М2, у которого:  $P_H = 7,5$  кВт;  $n_H = 2895$  мин<sup>-1</sup>;  $s_H = 3,5$  %;  $\eta_H = 87,5$ ;  $\mu_{\Pi} = 2$ ;  $\mu_{кр} = 2,2$ ;  $\mu_{min} = 1,6$ ;  $k_i = 7,5$ ;  $\cos\varphi_H = 0,88$ . Определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме.

*Решение:*

1. Скорость вращения вала двигателя при идеальном холостом ходе

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с.}$$

2. Скорость вращения вала двигателя при номинальной нагрузке

$$\omega_H = \omega_0(1 - s_H) = 314(1 - 0,035) = 303 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3. Номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{303} = 24,75 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4. Критический (максимальный) момент

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H = 2,2 \cdot 24,75 = 54,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Пусковой момент электродвигателя при  $s=1$

$$M_{\Pi} = \mu_{\Pi} \cdot M_H = 2 \cdot 24,75 = 49,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Минимальный момент двигателя при  $s=0,85$

$$M_{min} = \mu_{min} \cdot M_H = 1,6 \cdot 24,75 = 39,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Критическое скольжение

$$s_{кр} = s_{ном} \left[ \mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1} \right] = 0,035 \left[ 2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right] = 0,14.$$

8. Скорость вращения при  $s=s_{кр}$

$$w_{кр} = w_0(1 - s_{кр}) = 314(1 - 0,14) = 270 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

9. Скорость вращения при  $s=s_{min}$

$$w_{min} = w_0(1 - s_{min}) = 314(1 - 0,85) = 47,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

По расчетным данным строится механическая характеристика АД.

Текущее значение вращающего момента при заданных величинах скольжения (например, задаваясь значениями скольжения 0; 0,035; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1) определяют по упрощенной формуле Клосса (в качестве примера приведен расчет для значения скольжения  $s=0,1$ )

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = \frac{2 \cdot 54,5}{\frac{0,1}{0,14} + \frac{0,14}{0,1}} = 51,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Полученные значения  $M$  и  $w$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Данные к построению естественной механической характеристики

$s$	1	0,7	0,5	0,3	0,14	0,035	0
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	15,0	20,9	28,1	41,9	54,5	25,6	0
$w, \text{рад/с}$	0	94,2	157	219,8	270,0	303	314

На рисунке 2.1 представлена механическая характеристика 1, координаты которой определены только по каталожным данным, а для характеристики 2 момент определялся с использованием упрощенной формулы.

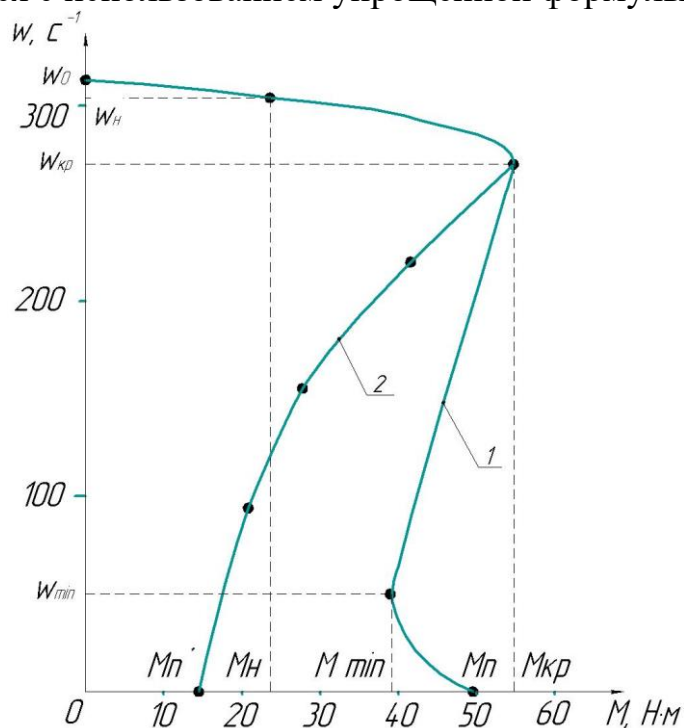


Рисунок 2.1 Механическая характеристика АД

## 2.3 Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** Для АД серии 4А и АИР из приложений 1 и 2 выписать согласно варианту значения: номинальной мощности на валу двигателя  $P_n$ , кВт; кратности критического момента  $\mu_{кр}$ ; кратности пускового момента  $\mu_p$ ; кратности пускового тока  $k_i$ ; номинального КПД  $\eta_n$ , %;  $\cos\varphi_n$ . По каталожным данным рассчитать и построить механическую и электромеханическую характеристики АД. Рассчитать и построить механическую характеристику АД по упрощенной формуле Клосса.

## 2.4 Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные части составляют конструкцию АД?
2. Какова методика построения естественных механической и электромеханической характеристик АД?
3. Что такое рабочая часть естественной механической характеристики АД?
4. Назовите характерные точки механической характеристики АД.
5. Что такое скольжение АД?

## 3 РАСЧЁТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ, СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА

Практическое занятие № 3

### 3.1 Основные формулы, используемые при выборе двигателя

Выбор электродвигателя производится обычно следующим образом: сначала рассчитывается требуемая мощность, а затем предварительно выбранный двигатель проверяется по условиям пуска, перегрузки и нагрева.

Продолжительный номинальный режим работы (*SI*) двигателя характеризуется неизменной нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Признаком режима *SI* является выполнение условия

$$t_p > 3T_n, \quad (3.1)$$

где  $t_p$  - время работы (включения) двигателя;

$T_n$  - постоянная времени нагрева электродвигателя.

Работа двигателя в режиме *SI* может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой.

Если при работе нагрузка не изменяется, то должен быть выбран двигатель с номинальной мощностью  $P_n$ , равной мощности нагрузки с учетом потерь в трансмиссии:

$$P_n \geq \frac{P_M}{\eta_n}, \quad (3.2)$$

где  $\eta_n$  - КПД передачи.

При переменной циклической нагрузке также будут изменяться его ток, момент и потери мощности. Проверка двигателя по нагреву в этом случае выполняется методами средних потерь или эквивалентных величин.

Сущность **метода средних потерь** заключается в определении средних потерь мощности  $\Delta P_{cp}$  за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности  $\Delta P_n$ , после чего делается заключение о нагреве двигателя.

Мощность двигателя для продолжительной переменной нагрузки

$$P_n \geq (1,2 \dots 1,3)P_M, \quad (3.3)$$

где  $P_M$  - среднее значение мощности по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма.

Коэффициент полезного действия при  $i$ -ой нагрузке

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1\right) \left(\frac{\frac{\alpha}{\chi_i} + \chi_i}{\alpha + 1}\right)}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь ( $\alpha = 1$  для ДПТ НВ,  $\alpha = 0,5$  для ДПТ ПВ,  $\alpha = 0,5 \dots 0,7$  для АД,  $\alpha = 1,5 \dots 2$  для синхронных двигателей);

$\chi$  - кратность тока ( $\chi_i = \frac{I_i}{I_n}$ ).

Средние потери мощности за цикл

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}. \quad (3.5)$$

Номинальные потери мощности двигателя определяются по каталожным данным по формуле (1.15).

Потери мощности на участках нагрузочной диаграммы при  $P_i$  нагрузке на валу двигателя

$$\Delta P_i = P_i \left( \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \right). \quad (3.6)$$

Допустимый нагрев двигателя будет при условии

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n. \quad (3.7)$$

Метод средних потерь позволяет оценить тепловой режим работы двигателя по среднему превышению температуры. В этом заключается определенная погрешность метода, поскольку максимальный перегрев двигателя на отдельных участках цикла может превышать средний. Кроме того, данный метод достаточно трудоемок, поэтому применяют другой, более удобный метод среднеквадратичных или эквивалентных величин.

Формула (3.5) справедлива, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными.

**Метод эквивалентного тока** целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени.

Ток  $I_{\text{ЭКВ}}$  по условиям нагрева эквивалентен действительному, изменяющемуся во времени току двигателя

$$I_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_1^n (I_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}}, \quad (3.8)$$

где  $t_{\text{ц}}$  - время цикла.

Условие проверки двигателя по нагреву имеет вид:

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_n. \quad (3.9)$$

Если выполняется условие (3.9), то при соблюдении указанных ранее условий нагрев двигателя не превысит допустимого уровня. Отметим, что условие (3.9) справедливо, если постоянные потери не изменяются за цикл работы. Это может быть при  $w=\text{const}$ ,  $\Phi=\text{const}$ .

**Метод эквивалентного момента** удобно использовать, когда известен график изменения момента двигателя во времени и обеспечивается постоянство магнитного потока двигателя на протяжении всего цикла работы.

Если условия выполняются, то формула для расчета эквивалентного по условиям нагрева момента имеет вид:

$$M_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_1^n (M_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}} \leq M_n. \quad (3.10)$$

**Метод эквивалентной мощности** используется, если известен график изменения мощности во времени, и при условии постоянства потерь, магнитного потока и скорости двигателя на всех участках рабочего цикла.

При этом эквивалентная по условиям нагрева мощность определяется по выражению

$$P_{\text{экв}} = \frac{\sum_1^n (P_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}} \leq P_{\text{н}}. \quad (3.11)$$

Если пуск осуществляется под нагрузкой, а выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, необходим проверочный расчет по условиям пуска.

Необходимые номинальный момент  $M_{\text{н пуск}}$  и мощность  $P_{\text{н пуск}}$  по условиям пуска:

$$M_{\text{н пуск}} = \frac{1,25M_c}{\mu_{\text{п}} \cdot u^2}, \quad (3.12)$$

$$P_{\text{н пуск}} = \frac{1,25P_c}{\mu_{\text{п}} \cdot u^2}, \quad (3.13)$$

где  $M_c$ ,  $P_c$  - соответственно статические момент и мощность сопротивления приводного механизма, Н·м;

$\mu_{\text{п}}$  - кратность минимального пускового момента;

$u$  - напряжение во время пуска, выраженное в относительных единицах.

При переменной нагрузке следует определить также, требуемую мощность двигателя по условиям допустимой перегрузки  $P_{\text{н пер}}$ , предполагая, что критический момент двигателя в 1,25 раз больше максимального момента нагрузки:

$$M_{\text{н пер}} = \frac{1,25M_{\text{max}}}{\mu_{\text{max}}}, \quad (3.14)$$

$$P_{\text{н пер}} = \frac{1,25P_{\text{max}}}{\mu_{\text{max}}}, \quad (3.15)$$

где  $M_{\text{н пер}}$  - номинальный момент электродвигателя по условию допустимой перегрузки;

$M_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{max}}$  - наибольшие момент и мощность нагрузки;

$\mu_{\text{max}}$  - кратность критического момента электродвигателя.

Окончательно двигатель выбирают по большему значению из  $P_{\text{ном}}$ ,  $P_{\text{н пуск}}$  и  $P_{\text{н пер}}$ .

## 3.2 Методика расчета мощности двигателя

### Метод средних потерь:

1. По нагрузочной диаграмме рабочей машины делают ориентировочный расчет мощности двигателя, пользуясь формулой (3.3).

2. В соответствии с ориентировочно рассчитанной мощностью, скоростью вращения рабочей машины и режимом работы подбирают двигатель по каталогу и записывают его технические данные.

3. Зная номинальный КПД двигателя по формуле (3.4) определяют КПД двигателя при частичных нагрузках согласно данным нагрузочной диаграммы.

4. Для каждого участка диаграммы по формуле (3.6) определяют потери мощности в двигателе.

5. По формуле (3.5) определяют среднее значение потерь мощности и проверяют расчетное значение по условию (3.7).

6. Выбранный двигатель проверяют по условию пуска (3.12), (3.13) и перегрузочной способности (3.14), (3.15).

#### **Метод среднеквадратичных величин:**

1. По формулам (3.8), (3.10) и (3.11) по данным нагрузочной диаграммы рассчитывают эквивалентные ток, момент и мощность двигателя.

2. В соответствии с ориентировочно рассчитанной мощностью, скоростью вращения рабочей машины и режимом работы подбирают двигатель по каталогу и записывают его технические данные.

3. Выбранный двигатель проверяют по условию пуска (3.12), (3.13) и перегрузочной способности (3.14), (3.15).

*Пример.* Определить необходимую мощность приводного электродвигателя, работающего в режиме *SI*, методом средних потерь.

Таблица 3.1 Данные нагрузок на валу двигателя и продолжительности работы по периодам

Нагрузка на валу двигателя по периодам, кВт	4	3	2	5
Продолжительность работы по периодам, мин	30	20	35	15

*Решение:*

1. Определяем приближенное значение мощности двигателя

$$P_H \geq 1,25P_M = 1,25 \cdot 3,25 = 4,05 \text{ кВт},$$

где

$$P_M = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{4 \cdot 30 + 3 \cdot 20 + 2 \cdot 35 + 5 \cdot 15}{30 + 20 + 35 + 15} = 3,25 \text{ кВт}.$$

2. Предварительно принимаем двигатель АИР100L4, имеющий  $P_H = 4$  кВт и  $\eta_H = 0,85$ .

3. При  $\alpha = 0,5$  определяем КПД двигателя для нагрузок  $P_1, P_2, P_3, P_4$ :

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1\right) \left(\frac{\frac{\alpha}{\chi_i} + \chi_i}{\alpha + 1}\right)},$$

где  $\chi_i = \frac{P_i}{P_H}$ ;

$$\chi_1 = \frac{P_1}{P_H} = \frac{4}{4} = 1; \chi_2 = \frac{P_2}{P_H} = \frac{3}{4} = 0,75; \chi_3 = \frac{P_3}{P_H} = \frac{2}{4} = 0,5; \chi_4 = \frac{P_4}{P_H} = \frac{5}{4} = 1,25.$$

Подставив числовые значения в формулу, получаем  $\eta_1 = 0,85; \eta_2 = 0,857; \eta_3 = 0,85; \eta_4 = 0,83$ .

4. Определяем потери мощности в двигателе при нагрузках  $P_1, P_2, P_3, P_4$ .  
Получаем  $\Delta P_1 = \Delta P_H = 706$  Вт;  $\Delta P_2 = 500$  Вт;  $\Delta P_3 = 353$  Вт;  $\Delta P_4 = 1024$  Вт.

5. Определяем средние потери мощности

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{cp}} &= \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \\ &= \frac{706 \cdot 30 + 500 \cdot 20 + 353 \cdot 35 + 1024 \cdot 15}{30 + 20 + 35 + 15} = 588,95 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

$$\Delta P_H = 706 > \Delta P_{\text{cp}} = 588,95.$$

6. По данным таблицы 3.1 определяют эквивалентную мощность на валу двигателя

$$\begin{aligned} P_{\text{экв}} &= \frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{4^2 \cdot 30 + 3^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 35 + 5^2 \cdot 15}{30 + 20 + 35 + 15} \\ &= 3,42 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Т.к.  $P_H > P_{\text{экв}}$ , то мощность предварительно выбранного двигателя принята правильно.

### 3.3 Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** На основании нижеприведенных данных определить мощность и выбрать асинхронный электродвигатель для механизма, работающего в режиме S1 с неравномерной нагрузкой методами средних потерь и эквивалентной мощности. Провести сравнительный анализ применения различных методов расчета.

Таблица 3.2 Исходные данные к построению нагрузочных диаграмм

Рисунок 1, а	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
--------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Рисунок 1, б	11	12	13	14	15	16	27	18	19	20
Рисунок 1, в	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t_1$ , МИН	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10
$t_2$ , МИН	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5
$t_3$ , МИН	40	30	20	40	30	20	40	30	20	40
$t_4$ , МИН	40	35	30	25	20	15	10	40	35	30
$P_1$ , кВт	11	15	4	8	22	13	20	6	12	9
$P_2$ , кВт	9	10	2	6	16	7	12	4	8	7
$P_3$ , кВт	3	6	1,5	3	10	5	7	2	5	2

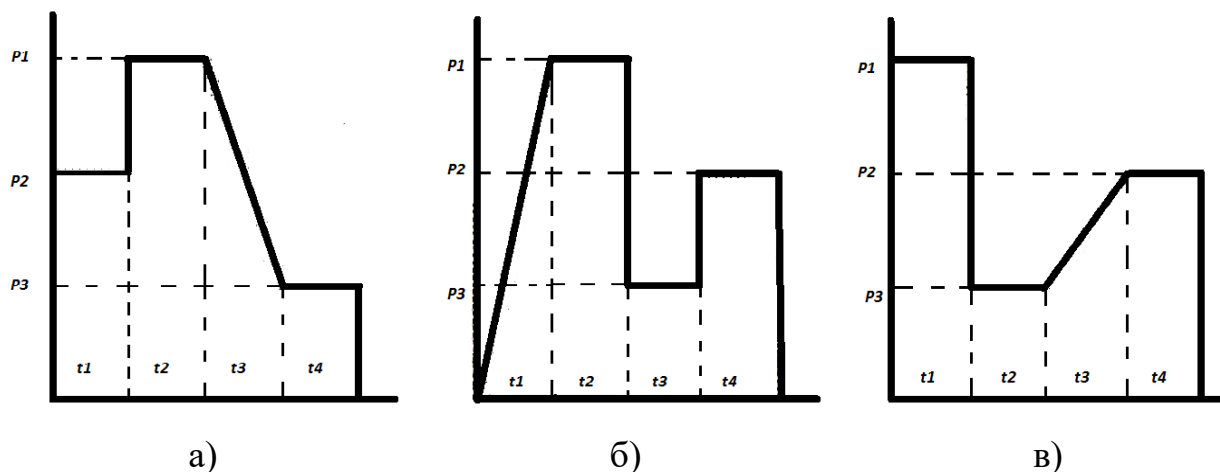


Рисунок 3.1 Виды нагрузочных диаграмм рабочих машин

### 3.4 Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается задача выбора электродвигателя?
2. Чем ограничивается допустимая нагрузка электродвигателей?
3. В чем сущность эквивалентных величин?
4. Что такое эквивалентный ток и как его вычислить?
5. На основании каких исходных данных производится расчет мощности двигателя?
6. Что такое нагрузочная диаграмма двигателя?
7. В чем сущность проверки двигателя по нагреву, перегрузке и условиям пуска?
8. Что такое метод средних потерь?

## 4 РАСЧЁТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КРАТКОВРЕМЕННОГО И ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Практическое занятие № 4

#### 4.1 Основные формулы, используемые при выборе двигателя

Стандартные (нормированные) значения продолжительности рабочего периода **кратковременного режима S2** – 10, 30, 60 и 90 мин. Для режима S2 должно выполняться условие

$$t_{\text{к.кат}} \geq t_{\text{ф}}, \quad (4.1)$$

где  $t_{\text{к.кат}}$ ,  $t_{\text{ф}}$  - соответственно длительность каталожного и фактического периода работы.

Коэффициент термической (тепловой) перегрузки

$$p_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{\Delta P_{\text{н}}} = \frac{1}{(1 - e^{-t_{\text{р}}/T_{\text{н}}})}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta P_{\text{к}}$  - потери мощности в двигателе при кратковременном режиме работы, Вт;

$t_{\text{р}}$  - время работы двигателя при неизменной нагрузке, с.

Коэффициент механической перегрузки

$$p_{\text{м}} = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{н}}} = \sqrt{(\alpha + 1)p_{\text{T}} - \alpha}. \quad (4.3)$$

где  $P_{\text{к}}$  - мощность нагрузки при кратковременном режиме работы двигателя, Вт;

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность при продолжительном режиме работы, Вт.

Мощность двигателя режима S1 для работы в кратковременном режиме S2 с нагрузкой  $P_{\text{к}} = P_{\text{э}}$

$$P_{\text{н}} \geq \frac{P_{\text{к}}}{p_{\text{м}}} = P_{\text{э}}/p_{\text{м}}. \quad (4.4)$$

Эквивалентная нагрузка в режиме S2

$$P_{\text{эКВ}} = \frac{\sum_1^n (P_i^2 \cdot t_i)}{\sum_1^n t_i}, \quad (4.5)$$

где  $t_i$  – текущее значение времени работы двигателя с нагрузкой  $P_i$ , с.

Мощность двигателя режима S2 с любой нормированной продолжительностью рабочего периода  $t_{\text{р.н.}}$

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{эКВ}} \sqrt{t_{\text{р}}/t_{\text{р.н.}}}, \quad (4.6)$$

где  $t_p$  - фактическое время работы двигателя, мин.

Длительность одного цикла работы при **повторно-кратковременном режиме S3**

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_0, \quad (4.7)$$

где  $t_p$ ,  $t_0$  – соответственно продолжительность работы двигателя при неизменной нагрузке и время (продолжительность) паузы, с.

Относительная продолжительность включения

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}}. \quad (4.8)$$

ГОСТ устанавливает продолжительность включения ПВ=15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла 10 мин.

Мощность двигателя режима S3 при работе в режиме S3 с нормированным значением ПВ<sub>н</sub>

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{ф}}}{\text{ПВ}_{\text{н}}}} = P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{ф}}}{\varepsilon_{\text{н}}}}, \quad (4.9)$$

где ПВ<sub>ф</sub> - фактическая продолжительность включения, %;

$\varepsilon_{\text{ф}}$ ,  $\varepsilon_{\text{н}}$  - фактическая и нормированная относительная продолжительность включения.

Мощность двигателя режима S1 при работе в режиме S3

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{ф}}^*}{100}}, \quad (4.10)$$

где ПВ<sub>ф</sub><sup>\*</sup> - фактическая продолжительность включения с учетом ухудшения теплоотдачи двигателя в отключенном состоянии:

$$\text{ПВ}_{\text{ф}}^* = t_p 100 / (t_p + \beta_0 t_0), \quad (4.10)$$

где  $\beta_0 = \frac{T_{\text{н}}}{T_0}$  - коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей: с независимой вентиляцией – 1; без принудительного охлаждения – 0,95...0,98; самовентилируемых – 0,45...0,55; защищенных самовентилируемых – 0,25...0,35.

## 4.2 Методика выбора двигателя для кратковременного режима работы

1. Исходные данные для выбора мощности двигателя по условиям нагрева – технологическая и нагрузочная характеристики. По первой определяется режим работы привода: продолжительный при  $\varepsilon > 0,6$ , кратковременный при  $\varepsilon < 0,1$ , повторно-кратковременный при  $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,6$ .

2. По значению  $I_k$ ,  $M_k$  или  $P_k$  одноступенчатого или по эквивалентным величинам (за время  $t_k$ ) двух-трехступенчатого графика кратковременной нагрузки предварительно выбирают двигатель и устанавливают величину постоянной времени нагрева.

3. Зная время  $t_k$  по графику нагрузки и значение постоянной времени нагрева  $T_H$ , по формуле (4.2) определяют коэффициент термической перегрузки  $p_T$ .

4. Зная  $p_T$  и  $\alpha$  по выражению (4.3) вычисляют коэффициент механической перегрузки  $p_M$ .

5. Мощность двигателя для длительного режима

$$P'_H = P_k / p_M.$$

6. По мощности  $P'_H$  выбирают двигатель продолжительного режима работы, номинальная мощность которого – ближайшая большая мощность к расчетной, и проверяют на перегрузочную способность и условие пуска.

7. При выборе специального двигателя, предназначенного для кратковременной нагрузки, когда время  $t_k \neq t_{p,H}$ , определяют  $P_H$  по формуле (4.6), пересчитанную на каталожную продолжительность работы. По найденной величине  $P_H$  и заданной  $t_{p,H}$  выбирают двигатель ближайшей большей мощности, предназначенный для кратковременного режима работы.

*Пример.* Выбрать асинхронный двигатель серии АИРС для привода скреперной установки УС-15 для уборки навоза на ферме крупного рогатого скота, если  $P_k = 2$  кВт,  $t_k = 12$  мин.

*Решение:*

1. Постоянную времени нагрева для двигателя серии АИРС подобной мощности можно принять равной 25 мин.

2. Коэффициент термической перегрузки

$$p_T = \frac{1}{(1 - e^{-t_p/T_H})} = \frac{1}{(1 - e^{-12/25})} = 2,62.$$

3. Коэффициент механической перегрузки

$$p_M = \sqrt{(\alpha + 1)p_T - \alpha} = \sqrt{(0,5 + 1)2,62 - 0,5} = 1,85.$$

4. Мощность двигателя длительного режима

$$P'_H = P_k/p_M = 2/1,85 = 1,08 \text{ кВт.}$$

5. По каталогу выбираем ближайший больший по мощности двигатель АИРС80В6 с номинальной мощностью  $P_H = 1,2 \text{ кВт}$ ;  $n_H = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\mu_{max} = 2,1$ ;  $\mu_\Pi = 1,9$ .

6. Номинальный, максимальный и пусковой моменты двигателя

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{0,105 \cdot n_H} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{0,105 \cdot 900} = 12,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H = 2,1 \cdot 12,7 = 26,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_\Pi = \mu_\Pi \cdot M_H = 1,9 \cdot 12,7 = 24,13 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Момент нагрузки при  $n = n_H = const$

$$M_H = \frac{9550 \cdot P_k}{n_H} = \frac{9550 \cdot 2}{900} = 21,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Т.к.  $M_{кр} = 26,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$  больше  $M_H = 21,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то двигатель удовлетворяет условию перегрузочной способности.

### 4.3 Методика выбора двигателя для повторно-кратковременного режима работы

*Пример.* Рассчитать мощность и выбрать двигатель компрессора холодильной машины по графику нагрузки, в котором  $P_1 = 10 \text{ кВт}$ ,  $t_p = 3 \text{ мин}$ ,  $t_o = 7 \text{ мин}$ .

*Решение:*

1. Фактическая продолжительность включения

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_{ц}} = \frac{3}{3 + 7} = 0,3.$$

2. Эквивалентная мощность за время полного цикла

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_p}{t_{ц}}} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 3}{10}} = 5,48 \text{ кВт}.$$

3. Пересчитаем эквивалентную мощность на стандартную продолжительность включения  $\varepsilon_H = 0,4$

$$P_{0,4} = P_{\text{экв}} \sqrt{\varepsilon_H} = 5,48 \sqrt{0,4} = 8,66 \text{ кВт.} \quad (4.9)$$

4. По каталогу выбираем двигатель типа 4АС160S8У3:  $P_H=9,0$  кВт;  $\varepsilon = 0,4$ ;  $\mu_{\text{кр}} = 2$ ;  $s_H=9,6\%$ ;  $n_H=678$  мин<sup>-1</sup>.

5. Максимальный момент двигателя

$$M_{\text{кр}} = 9550 \frac{P_H}{n_H} \mu_{\text{кр}} = 9550 \frac{9}{678} 2 = 253 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Максимальный момент, соответствующий мощности  $P_1$  графика нагрузки

$$M_{\text{max}} = 9550 \frac{10}{678} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

следовательно выбранный двигатель обеспечивает перегрузочную способность, т.к.

$$M_{\text{кр}} > M_{\text{max}}.$$

#### 4.4 Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** Выбрать двигатель серии 5А продолжительного режима для работы в повторно-кратковременном режиме, основные данные которого приведены в задаче, рассмотренной в разделе 4.3.

**Задача 2.** Рассчитать, какую мощность должен развивать АД при номинальной частоте вращения  $n_H=1395$  мин<sup>-1</sup>, если действительный график нагрузки задан значениями  $M_1=20$  Н·м;  $M_2=15$  Н·м;  $t_1=4$  мин;  $t_2=21$  мин.

**Задача 3.** Рассчитать мощность и выбрать двигатель, исходя из заданного графика нагрузки, согласно которому:  $P_1=9$  кВт;  $P_2=4$  кВт;  $P_3=5$  кВт;  $t_1=3$  с;  $t_2=35$  с;  $t_3=2$  с;  $t_0=60$  с.

**Задача 4.** Для выбранного в разделе 3.3 электродвигателя, предназначенного для работы в режиме S1, определить допустимую по условиям нагрева мощность нагрузки ( $P_{\text{дон}}$ ) при его работе в режимах S2 и S3 согласно индивидуальному заданию. В обоих случаях (для режимов S2 и S3) требуется проверить электродвигатель по условию обеспечения перегрузочной способности с учетом потери напряжения в сети.

Таблица 4.1 Исходные данные для работы электропривода в режимах S2 и S3

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
S2 - $t_p$ , мин	35	15	45	50	55	25	40	20	50	55
S3 - $t_p$ , мин	3	4	5	3	3	4	5	3	5	4
S3 - $t_n$ , мин	3	5	4	3	3	5	4	3	4	5
Потеря напряжения, %	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10

Значения постоянных времени нагрева  $T_n$  и охлаждения  $T_o$  во всех вариантах принять равными:  $T_n = 20$  мин,  $T_o = 60$  мин.

#### 4.5 Вопросы для самоконтроля

1. Как выбирается двигатель для механизмов кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы?
2. Назовите стандартные (нормированные) значения продолжительности рабочего периода кратковременного режима.
3. Что такое продолжительность включения и какие его значения установлены ГОСТом?

### 5 ИЗУЧЕНИЕ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ Практическое занятие № 5

#### 5.1 Выбор аппаратов ручного управления

Рубильники и переключатели предназначены для нечастых (не более шести в час) неавтоматических включений, отключений и переключений электрических цепей переменного тока напряжением до 660 В и частотой 50 Гц.

Пакетные выключатели и переключатели применяют в качестве вводных переключателей цепей управления электроустановок, распределения электроэнергии и для ручного управления АД напряжением до 380 В.

Кнопки управления используют для дистанционного управления контакторами, пускателями и другими электромагнитными аппаратами, а также для коммутирования

Рубильники, пакетные выключатели и переключатели, кнопки управления выбирают по следующим параметрам:

$$U_n \geq U_{н.уст}; \quad (5.1)$$

$$I_n \geq I_{н.уст}; \quad (5.2)$$

где  $U_n, U_{н.уст}$  - соответственно номинальные напряжения аппарата управления и электроустановки, В;

$I_n, I_{н.уст}$  - соответственно номинальные токи аппарата управления и электроустановки, А.

Кроме того, при выборе типа аппарата учитывают необходимое количество полюсов, схему соединений и условия окружающей среды.

## 5.2 Выбор магнитных пускателей

Магнитные пускатели (МП) предназначены для дистанционного и автоматического управления асинхронными двигателями и их тепловой защиты. Выбор магнитных пускателей в систему управления электроприводом осуществляют по конструктивному исполнению, а также по следующим условиям

$$U_{н.пуск} \geq U_{н.дв}; \quad (5.3)$$

$$U_{н.кат} \geq U_{упр}; \quad (5.4)$$

$$I_{н.пуск} \geq I_{р.мах}, \quad (5.5)$$

где  $U_{н.пуск}$  - номинальное напряжение магнитного пускателя, В;

$U_{н.дв}$  - номинальное напряжение электродвигателя, В;

$U_{н.кат}$  - номинальное напряжение питания катушки пускателя, В;

$U_{упр}$  - номинальное напряжение цепи управления электродвигателя, В;

$I_{н.пуск}$  - номинальный ток магнитного пускателя, А;

$I_{р.мах}$  - максимальный рабочий ток электродвигателя, А.

Выбор конструктивного исполнения МП производят с учетом требований системы управления АД:

- по характеру вращения электродвигателя, коммутируемого пускателем: непереворачиваемый или реверсивный;

- по наличию тепловых реле: без тепловых реле или укомплектованные тепловыми реле;

- по наличию и количеству дополнительных контактов (сигнальных, блокировочных), которые могут быть замыкающими (з) или размыкающими (р). Дополнительные контакты могут быть встроены в пускатель или изготовлены в виде отдельной приставки;

- по степени защиты от воздействия окружающей среды: открытого (IP00), защищенного (IP40) или пылебрызгонепроницаемого (IP54) исполнения.

Наибольшее применение находят магнитные пускатели с контактными системами и электромагнитным приводом типов ПМЕ, ПМА, ПА (ПАЕ).

### 5.3 Выбор плавких предохранителей

Плавкие предохранители могут использоваться для защиты электрических двигателей и цепей управления от токов короткого замыкания.

Электрические двигатели относятся к классу электроприемников, включение которых характеризуется значительной продолжительностью изменения тока в цепи. Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором может в 5...7 раз превышать номинальный. По мере разгона двигателя пусковой ток падает до значения, равного номинальному току машины. Длительность пуска зависит от характера нагрузки.

Следовательно, выбирать плавкую вставку предохранителя по номинальному току двигателя нельзя, т.к. она перегорит при пуске. Нельзя выбирать плавкую вставку и по пусковому току, т.к. не будет обеспечена необходимая защита. Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Поэтому выбор плавкой вставки предохранителя для защиты электрических двигателей производят в зависимости от режима их пуска.

Предохранитель по номинальному напряжению выбирают из условия

$$U_{н.пр} \geq U_c, \quad (5.6)$$

где  $U_c$  - номинальное напряжение сети, В.

Плавкую вставку предохранителя выбирают из условия

$$I_{п.вст} \geq I_{р.мах}, \quad (5.7)$$

где  $I_{р.мах}$  - максимальный рабочий ток цепи, которую защищает предохранитель, А.

В зависимости от режима пуска плавкую вставку выбирают по условию

$$I_{п.вст} \geq \frac{I_n}{\alpha}, \quad (5.8)$$

где  $I_n$  - пусковой ток электродвигателя, А;

$\alpha$  - коэффициент, характеризующий условия пуска электродвигателя.

Для электродвигателей с легкими условиями пуска (нечастые пуски до 15 пусков в час с длительностью пуска 5...10 с) характерных для двигателей привода механизмов с относительно небольшой инерцией (насосов, вентиляторов и др.)  $\alpha = 2,5$ .

Для электродвигателей с тяжелыми условиями пуска (более 15 пусков в час с длительностью пуска от 10 до 40 с), когда двигатель медленно разворачивается (например, привод центрифуги), или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски происходят с большой частотой  $\alpha = 1,6... 2,0$ .

Величина пускового тока асинхронного электродвигателя определяется из выражения (2.7).

Для группы электродвигателей, когда их число не превышает пяти, ток плавкой вставки определяют по формуле

$$I_{\text{п.вст}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{н}} + I_{\text{п.наиб}}}{\alpha}, \quad (5.9)$$

где  $I_{\text{п.наиб}}$  - пусковой ток электродвигателя с наибольшим пусковым током, А;

$\sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{н}}$  - сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей без двигателя с наибольшим пусковым током, А.

При количестве электродвигателей больше пяти, ток плавкой вставки определяют по формуле

$$I_{\text{п.вст}} = \sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{н}} + \frac{I_{\text{п.наиб}}}{\alpha}, \quad (5.10)$$

где  $I_{\text{п.наиб}}$  - пусковой ток электродвигателя с наибольшим пусковым током, А;

$\alpha$  - коэффициент, характеризующий условия пуска электродвигателя с наибольшим пусковым током.

Расчетное значение тока плавкой вставки округляют до ближайшего большего значения, выбираемого из стандартного ряда номинальных токов плавких вставок: 2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500 А.

Следует отметить, что плавкие вставки, выбранные таким образом, работают с большим запасом и в процессе пуска нагреваются до небольших температур (порядка 65° С при расчетной температуре окружающей среды 25° С).

## 5.4 Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели (АВ) служат для отключения электрической цепи при ненормальных и аварийных режимах - перегрузках, коротких замыканиях, чрезмерном понижении напряжения питания, изменении направления мощности и т.п. Автоматические выключатели можно также использовать для редких включений и отключений номинальных токов нагрузки.

Для защиты двигателя от перегрузок используются тепловые расцепители автоматического выключателя, а для защиты от коротких замыканий - электромагнитные расцепители.

Автоматический выключатель для защиты асинхронного двигателя выбирают из следующих условий

$$U_{н.авт} \geq U_{н.дв}; \quad (5.11)$$

$$I_{н.авт} \geq I_{н.дв}; \quad (5.12)$$

$$I_{н.т} \geq k_{н.т} \cdot I_{р.мах}, \quad (5.13)$$

$$I_{ср.эл} = 12I_{н.т}, \quad (5.14)$$

где  $U_{н.авт}$  - номинальное напряжение автоматического выключателя, В;

$U_{н.дв}$  - номинальное напряжение электродвигателя, В;

$I_{н.авт}$  - номинальный ток автоматического выключателя, А;

$I_{н.дв}$  - номинальный ток асинхронного электродвигателя, А;

$I_{н.т}$  - номинальный ток теплового расцепителя, А;

$k_{н.т}$  - коэффициент запаса тепловой перегрузки, принимаемый равным 1,1 ... 1,3;

$I_{р.мах}$  - максимальный рабочий ток асинхронного электродвигателя, А;

$I_{ср.эл}$  - ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А.

Максимальный рабочий ток асинхронного электродвигателя равен

$$I_{р.мах} = k_3 \cdot I_n, \quad (5.15)$$

где  $k_3$  - коэффициент загрузки АД, обычно равный 1.

Затем выполняют проверку выбранного автоматического выключателя на несрабатывание при пуске двигателя. Для этого должно выполняться следующее условие

$$I_{ср.эл} \geq (1,5 \dots 1,6)I_n, \quad (5.16)$$

В случае защиты автоматическим выключателем нескольких электродвигателей его проверку на несрабатывание при пуске двигателей проверяют по условию

$$I_{ср.эл} = (1,5 \dots 1,8) [\sum_{i=1}^n I_n + I_{н.наиб} - I_{н.наиб}], \quad (5.17)$$

где  $(I_{н.наиб} - I_{н.наиб})$  - разность между пусковым и номинальным токами электродвигателя, у которого они наибольшие, А;

$\sum_{i=1}^n I_n$  - сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей, А.

## 5.5 Выбор тепловых реле

Тепловые реле (*ТР*) предназначены для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от токов перегрузок недопустимой продолжительности и токов, возникающих при обрыве одной из фаз электродвигателя.

Тепловые реле следует применять совместно с аппаратами защиты от токов короткого замыкания в сети, так как они имеют ограниченную термостойкость при сквозных токах короткого замыкания.

Тепловое реле выбирается по номинальному току теплового элемента таким образом, чтобы номинальный ток защищаемого электродвигателя находился в зоне регулировки номинального тока несрабатывания теплового реле (максимального тока, при котором реле не срабатывает) по формуле

$$I_{min.тр} < I_{н.дв} < I_{max.тр}, \quad (5.18)$$

где  $I_{min.тр}$  и  $I_{max.тр}$  – нижняя и верхняя границы изменения уставки теплового реле, А;

$I_{н.дв}$  – номинальный ток асинхронного электродвигателя, А.

В производстве широкое применение нашли тепловые реле серий РТЛ, ТРН, ТРТП и РТТ.

## 5.6 Примеры выбора аппаратуры управления и защиты

*Пример 1.* Выбрать плавкие вставки предохранителей для защиты электрических линий напряжением 380/220 В, которые питают три электродвигателя *М1*, *М2* и *М3* (рисунок 5.1).

Двигатель *М2* с тяжелым режимом пуска, *М1* и *М3* с легким пуском. Все двигатели пускают поочередно. Двигатели подключены к распределительному щиту *РЩ*, который через кабель *К* и предохранитель *FU4* получает питание от шины трансформаторной подстанции. Коэффициент одновременности для кабельных линий  $K_{од}=1$ . Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.1.

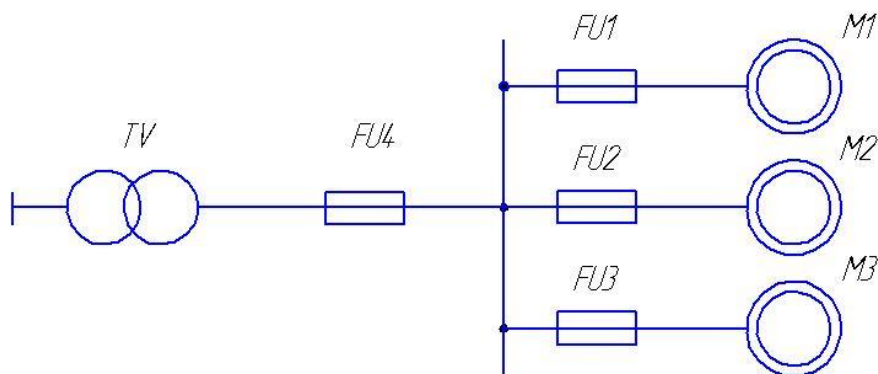


Рисунок 5.1 Схема сети

Таблица 5.1 Исходные данные для расчета

Показатели	Двигатель		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
Марка	АИР132S4У3	4АМ160М6У3	4АМ90L2У3
Номинальная мощность, кВт	7,5	15,0	3,0
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1440	975	2820
КПД, %	87,5	88,0	84,5
Коэффициент мощности $\cos\varphi_n$	0,86	0,82	0,88
Кратность пускового тока $k_i$	7,5	6,5	6,5
Коэффициент загрузки $k_z$	0,9	1,0	0,95

Решение:

1. Выбираем плавкую вставку предохранителя *FU1* для защиты электродвигателя *M1*. Номинальный ток двигателя

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_H \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,2 \text{ А.}$$

Рабочий ток двигателя

$$I_{p.max} = k_z \cdot I_H = 0,9 \cdot 15,2 = 13,7 \text{ А.}$$

Пусковой ток двигателя

$$I_{п} = k_i \cdot I_H = 7,5 \cdot 15,2 = 114 \text{ А.}$$

Номинальный ток плавкой вставки

$$I_{п.вст} \geq \frac{I_{п}}{\alpha} = \frac{114}{2,5} = 45,6 \text{ А.}$$

Выбираем плавкую вставку на ближайшее большее стандартное значение 50 А.

2. Аналогично выбираем плавкие вставки предохранителей *FU2*  $I_{п.вст} = 100 \text{ А}$  и *FU3*  $I_{п.вст} = 16 \text{ А}$  (проверочный расчет и выбор произвести самостоятельно).

3. Определяем ток плавкой вставки предохранителя *FU4* для защиты кабеля, проложенного от трансформатора к распределительному щиту

$$I_{п.вст} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} I_H + I_{п.наиб}}{\alpha} = \frac{(15,2 + 5,8) + 205,4}{2} = 113,2 \text{ А.}$$

Выбираем плавкую вставку предохранителя  $FU4$  на ток 150 А.

*Пример 2.* Для условий задачи, изложенной в *примере 1*, вместо предохранителей  $FU1-FU4$  выбрать соответственно автоматические выключатели  $QF1-QF4$ .

*Решение:*

1. Выбираем автомат  $QF1$  для защиты электродвигателя  $M1$ . Принимаем следующие условия выбора:

$$I_{н.авт} \geq I_{н.дв};$$

$$I_{н.т} \geq k_{н.т} \cdot I_{р.мах},$$

$$I_{ср.эл} = 12I_{н.т}.$$

Определяем ток теплового расцепителя

$$I_{н.т} \geq 1,2 \cdot 13,7 = 16,4 \text{ А.}$$

Выбираем автоматический выключатель АЕ2026М с комбинированным расцепителем,  $I_{н.авт} = 16 \text{ А}$ ;  $I_{н.т} = 16 \text{ А}$  [3].

Проверяем автоматический выключатель по току срабатывания электромагнитного расцепителя. Для выбранного автомата

$$I_{ср.эл} = 12 \cdot 16 = 192 \text{ А.}$$

Условие

$$I_{ср.эл} = 182,4 \geq (1,5 \dots 1,6)I_{п} = 1,5 \cdot 114 = 171$$

выполняется, следовательно, автоматический выключатель выбран правильно.

2. Аналогично выбираются автоматические выключатели  $QF2-QF4$ . Расчет и выбор произвести **самостоятельно**.

*Пример 3.* На основании данных *примера 1* выбрать магнитные пускатели и тепловые реле к ним для двигателей  $M1-M3$ . Для двигателя  $M1$  требуется изменение направления вращения, двигатели  $M2$ ,  $M3$  вращаются в одну сторону. Напряжение втягивающей катушки для всех пускателей 220 В.

*Решение:*

1. Магнитные пускатели выбирают по следующим условиям:

$$U_{\text{н.пуск}} \geq U_{\text{н.дв}};$$

$$U_{\text{н.кат}} \geq U_{\text{упр}};$$

$$I_{\text{н.пуск}} \geq I_{\text{р.мах}}.$$

Кроме того, при выборе нужно учитывать:

1. Характер вращения и наличие теплового реле.
2. Количество контактов вспомогательных цепей.
3. Климатическое исполнение и категория размещения.
4. Износостойкость.
5. Наличие дополнительных устройств (приставки контактные, промежуточные реле и др.).

Тепловые реле выбирают к магнитным пускателям по току несрабатывания и регулируют уставку.

Для двигателя М1 с номинальным током 15,2 А необходим пускатель второй величины на ток 25 А типа ПМЛ-260002В и тепловое реле РТЛ-102104 на токи 13...19 А. Тепловое реле настраиваем на ток 15,2 А [3].

2. Аналогично производится подбор к остальным электродвигателям (выбор произведите **самостоятельно**).

## 5.7 Вопросы для самоконтроля

1. Объясните устройство и принцип действия электромагнитных аппаратов управления.
2. Чем магнитный пускатель отличается от контактора?
3. Чем отличаются понятия «номинальный ток предохранителя» и «номинальный ток плавкой вставки»?
4. Какие серии автоматических выключателей применяют в сельскохозяйственном производстве?
5. Как выбирают автоматические выключатели?
6. Какие существуют серии магнитных пускателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве?
7. Как выбирают магнитные пускатели?
8. Что такое температурная компенсация теплового реле и для чего она служит?
9. Какие расцепители устанавливают в автоматических выключателях?
10. В чем преимущества автоматических выключателей перед предохранителями?

# 6 ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДА И СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОРОШЕНИЯ

Практическое занятие № 6

## 6.1 Общие сведения о насосных установках

В современной технике большой класс составляют машины для подачи жидкостей - насосы. В животноводстве и птицеводстве ежедневно расходуется большое количество воды на поение, приготовление кормов, мойку доильной аппаратуры, посуды, на переработку продукции и др. В с.х. производстве применяют башенные и безбашенные насосные установки. Основными параметрами, характеризующими работу таких машин, являются производительность (подача), давление и напор.

Производительность – количество жидкости, перемещаемых машиной в единицу времени. Во многих случаях при использовании насосов необходимо регулирование их подачи.

Напор насоса — избыточное давление, создаваемое насосом. Напор измеряется в метрах.

Подачу можно регулировать изменением скорости вращения механизма, а также изменением сопротивления магистрали, уменьшая, например, ее сечение. Наибольший интерес представляет собой способ регулирования подачи изменением скорости двигателя.

Зная расход и напор, по каталогу выбирают насос с подходящими параметрами с учетом возможной частоты вращения приводного двигателя. По универсальной характеристике выбранного насоса уточняют его производительность  $Q_n$ , напор  $H_n$  и КПД  $\eta_n$ . Мощность двигателя привода определяют из условия сообщения кинетической энергии масс воды, подаваемой за секунду и преодоления потерь в насосе и в передаче

$$P_{дв} = \frac{m \cdot v^2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_n} \cdot \frac{1}{\eta_p}, \quad (6.1)$$

где  $m = \gamma \cdot F \cdot v$ , масса воды, подаваемой насосом в единицу времени, кг/с;

$\gamma$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  - внутреннее сечение трубопровода, м<sup>2</sup>;

$v$  – скорость движения воды в трубопроводе, м/с.

Так как скорость  $v$  движения воды пропорциональна частоте вращения вала насоса, то  $Q \propto n$ , а  $H \propto n^2$ , значит  $P_{ог} \propto n^3$ , а момент двигателя

$$M_{дв} = 9,55 \frac{P_{дв}}{n} \propto n^2.$$

Эту зависимость следует иметь ввиду при выборе и компоновке агрегата двигатель-насос. Выбирая электронасосный агрегат по каталогу, необходимо

учитывать его характеристики и характеристику магистрали, на которую работает насос.

## 6.2 Пример выбора электродвигателя к насосной установке

*Пример.* Для животноводческой фермы определить потребность в воде, произвести выбор насоса и электрического двигателя к нему. Для водоснабжения используют башенную насосную установку.

*Исходные данные:*

1. На животноводческой ферме содержится:  
дойных коров  $N=450$  голов;  
молодняка крупного рогатого скота в возрасте до двух лет  $N_2=750$  голов, до трех лет  $N_3=100$  голов;  
рабочих лошадей  $N_4=100$  голов.
2. Суточные нормы потребления воды на 1 голову:  
дойные коровы  $q_1=0,08$  м<sup>3</sup>;  
молодняк крупного рогатого скота в возрасте до двух лет  $q_2=0,03$  м<sup>3</sup>, до трех лет  $q_3=0,05$  м<sup>3</sup>;  
рабочие лошади  $q_4=0,06$  м<sup>3</sup>.
3. Водоисточник – скважина глубиной бурения 117 м, высота водяного столба в скважине  $H_{св}=10$  м.
4. Дебет скважины 3 л/с.
5. Средний диаметр обсадочных труб  $d_m=200$  мм.
6. Объем бака водонапорной башни  $V=30$  м<sup>3</sup>.
7. Диаметр верхней части бака  $D_б=2,5$  м.
8. Высота регулируемого объема бака  $h_p=0,5$  м.
9. Максимальная отметка воды в баке над нулевой отметкой скважины  $H_б=+18$  м.
10. Расстояние от скважины до башни  $l=200$  м.
11. Скорость движения воды в трубопроводе  $v=1$  м/с.
12. Материал водопроводных труб – чугун.
13. Диаметр труб  $d=60$  мм.
14. Суммарные потери напора в местных сопротивлениях  $\sum \beta = 3,5$  м.
15. Схема управления насосной установкой состоит из автоматического выключателя, магнитного пускателя, кнопочных станций, реле давления и переключателя режимов работы.

*Решение:*

Насос выбирают, исходя из следующих условий:

$$H_n \geq H_p, Q_n \geq Q_{max.ч.}, \quad (6.1)$$

где  $H_n$  – напор, создаваемый насосом, м;

$H_p$  – расчетный напор, м;

$Q_n$  – производительность насоса, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{\max.ч.}$  – максимальный часовой расход воды на ферме, м<sup>3</sup>/ч.

Максимальный часовой расход воды или производительность насоса (водоснабжения) находят из следующего соотношения:

$$Q_n = Q_{\max.ч.} = \frac{K_u \cdot K_{сут} \cdot Q_{ср.сут}}{24\eta} = \frac{2,5 \cdot 1,3 \cdot 67,7}{24 \cdot 0,9} = 10,18 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (6.2)$$

где  $K_u$  – коэффициент неравномерности часового расхода (для поселка 1,5...2,5, для фермы с автопоилками 2...3, для фермы без автопоилок 4...5);

$K_{сут}$  – коэффициент неравномерности суточного расхода,  $K_{сут}=1,1...1,3$ ;

$\eta$  – КПД установки, учитывающий потери воды от насоса до потребителя,  $\eta=0,9$ ;

$Q_{ср.сут}$  – среднесуточный расход воды, л/сут (определяется по нормам водопотребления).

Суточное потребление воды зависит от числа потребителей и расхода воды каждым потребителем

$$Q_{ср.сут} = q_1 \cdot N_1 + q_2 \cdot N_2 + \dots + q_m \cdot N_m = 0,08 \cdot 450 + 0,03 \cdot 750 + 0,05 \cdot 100 + 0,06 \cdot 70 = 67,7, \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (6.3)$$

Напор насоса выбирают таким, чтобы он мог подать воду при необходимом давлении в заданную точку. Расчетный напор определяется по формуле

$$H_p = H_z + H_n + H_c = 125 + 5,4 + 10 = 140,4 \text{ м}, \quad (6.4)$$

где  $H_z$  – геодезический напор – высота подъема от нижнего до верхнего уровня, м;

$H_n$  – потери напора во всасывающем и напорном трубопроводах, м;

$H_c$  – свободный напор, м (при одноэтажной застройке у водоразборных колонок, при выходе воды из водопроводов  $H_c=10$  м).

Геодезический напор

$$H_z = H_{ск} - H_{вс} + H_б = 117 - 10 + 18 = 125 \text{ м}, \quad (6.5)$$

где  $H_{ск}$  – глубина скважины, м;

$H_{вс}$  – высота водяного столба в скважине, м;

$H_б$  – высота башни, м.

Потери напора по длине трубопровода

$$H_n = \frac{v^2}{2g} \left( \alpha \frac{L}{d} + \sum \beta \right) = \frac{1^2}{2 \cdot 9,81} \left( 0,02 \frac{307}{0,06} + 3,5 \right) = 5,4 \text{ м}, \quad (6.6)$$

где  $v$  – скорость движения воды, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коэффициент сопротивления, зависящий от скорости движения воды и материала труб (для труб из чугуна  $\alpha = 0,02$ ; бетона –  $0,022$ ; асбоцемента –  $0,025$ );

$L$  – длина трубопровода,  $L = H_{ск} - H_{вс} + l = 117 - 10 + 200 = 307$  м;

$d$  – диаметр трубопровода, м;

$\sum \beta = 3,5$ - суммарные потери напора в местных сопротивлениях, м.

По расчетному напору и производительности, исходя из вышеуказанных условий, выбирают насос: тип ЭЦВ6-10-185 (производительность  $Q_n = 12$  м<sup>3</sup>/ч; напор  $H_n = 155$  м; КПД насоса  $\eta_n = 0,6$ ; частота вращения насоса  $n_n = 2850$  мин<sup>-1</sup>).

Потребная мощность насоса

$$P_n = \frac{Q_{\max ч} \cdot H_p \cdot \gamma}{3600 \cdot \eta_{\pi} \cdot \eta_n \cdot 10^3} = \frac{10,18 \cdot 140,4 \cdot 9810}{3600 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^3} = 6,49 \text{ кВт}, \quad (6.7)$$

где  $\eta_{\pi}$  – КПД передачи (для прямой передачи  $\eta_{\pi} = 1$ ; зубчатой –  $0,97$ ; клиноременной –  $0,98$ ; плоскоременной –  $0,95$ );

$\eta_n$  – КПД насоса (для центробежных насосов  $\eta_n = 0,4 \dots 0,8$ ; для вихревых –  $0,25 \dots 0,5$ );

$\gamma$  – удельный вес воды, Н/м<sup>3</sup>.

В реальных условиях работы насосов могут возникать утечки воды из напорного трубопровода. Поэтому электродвигатели выбирают с запасом мощности [2]

$$P_p = k_3 \cdot P_n = 1,17 \cdot 6,49 = 7,6 \text{ кВт}, \quad (6.8)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, зависящий от  $P_n$ .

$P_n$ , кВт	$\leq 1$	1	2	3	4	5	8	10	$\geq 10$
$k_3$	2	1,7	1,5	1,33	1,25	1,2	1,12	1,1	1,05

Регулируемый объем бака

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} h_p = \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} 0,5 = 2,45 \text{ м}^3. \quad (6.9)$$

Время работы насосной установки

$$t_p = \frac{V_p}{Q_n - Q_{\max ч}} = \frac{2,45}{12 - 10,18} = 1,34 \text{ ч}. \quad (6.10)$$

Время паузы насосной установки

$$t_{\text{п}} = \frac{V_{\text{р}}}{Q_{\text{макс ч}}} = \frac{2,45}{10,18} = 0,24 \text{ ч.} \quad (6.11)$$

Продолжительность включения насосной установки

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_{\text{п}}} 100\% = \frac{1,34}{1,34 + 0,24} 100 = 84,8\%. \quad (6.12)$$

Из продолжительности включения насосной установки следует, что режим работы ее продолжительный.

Электрический двигатель для привода насоса выбираем, исходя из условий:

1. Климатическое исполнение и категория размещения *У5*.
2. По способу защиты от окружающей среды *IP68*.
3. По конструктивному исполнению и способу монтажа *IM1081*.
4. По модификации (выбирается погружной двигатель).
5. По частоте вращения  $n_{\text{дв}} \geq n_{\text{н}}$ .
6. По роду тока и напряжению ( $\sim I$ ,  $U_{\text{н}}=380/220 \text{ В}$ ).
7. По мощности  $P_{\text{дв}} \geq P_{\text{р}}$ .

Выбираем погружной двигатель ПЭДВ 8-140:  $P_{\text{дв}} = 8 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{дв}} = 2850 \text{ мин}^{-1}$ ;  $I_{\text{н}}=18,3 \text{ А}$ ;  $U_{\text{н}}=380/220 \text{ В}$ ,  $\eta_{\text{н}} = 0,8$ .

Проверка двигателя по условию пуска и перегрузочной способности в данном случае не требуется.

### 6.3 Автоматизация насосных установок

Для автоматизации насосных установок кроме аппаратуры общего применения (контакторов, магнитных пускателей, переключателей, промежуточных реле) применяются специальные аппараты управления и контроля, например реле контроля уровня, реле контроля заливки центробежных насосов, струйные реле и т.д.

В качестве реле контроля уровня используются: поплавковое реле, электродные реле уровня (электродные датчики), манометры различных типов, устанавливаемые на трубопроводе, датчики емкостного типа, радиоактивные датчики.

Поплавковые реле уровня применяются обычно для контроля уровня неагрессивных жидкостей. Устройство поплавкового реле уровня показано на рисунке 6.1.

В открытый резервуар, в котором контролируется уровень жидкости (рисунок 6.1, а), погружен поплавок 1, подвешенный на гибком канате через блок 3 и уравновешенный грузом 6. На канате укреплены две шайбы 2 и 5, которые при предельных уровнях жидкости в резервуаре поворачивают

коромысло 4 контактного устройства 8. Оно замыкает соответственно контакты 7 и 9, от которых идут провода в цепи управления и сигнализации насосной установки. В закрытом резервуаре (рисунок 6.1, б) поплавок 1 рычагом связан с осью рычага 10, которая с соответствующим уплотнением пропускается через стенку корпуса в пространство, где располагается контактная часть 11 реле.

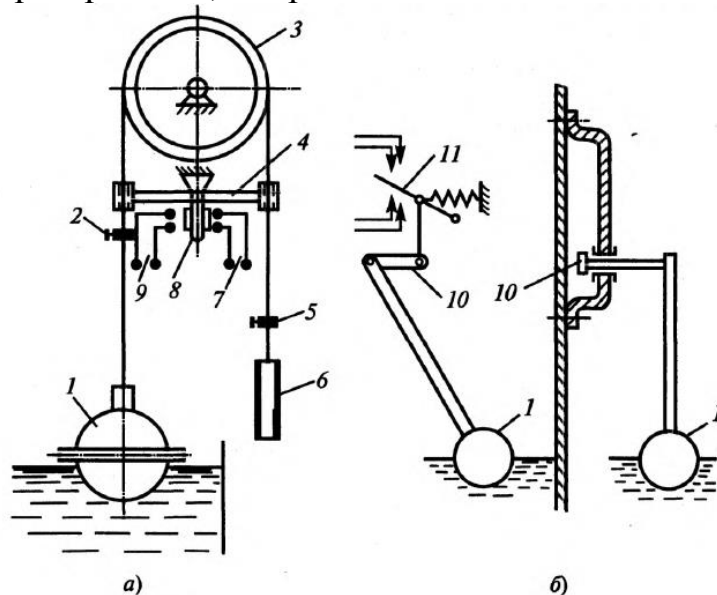


Рисунок 6.1 Схема поплавкового реле уровня

Для электропроводных жидкостей применяется электродное реле уровня, принцип действия которого показан на рисунке 6.2. Реле состоит из металлических электродов 1 и 4, помещенных в корпусе 2. Реле опускается в резервуар 3. Электроды включены в цепь катушки промежуточного реле РП. При подъеме уровня жидкости до верхнего электрода 4 образуется проводящий промежуток между электродами 1 и 4. Реле РП срабатывает, становится на самопитание через свой замыкающий контакт, а другими контактами (на рисунке не показаны) производит необходимые переключения в цепях управления и сигнализации насосной установки. При опускании уровня жидкости ниже электрода 1 цепь питания катушки через контакт РП прерывается, реле РП обесточивается и своими контактами опять производит переключения в схеме управления и сигнализации.

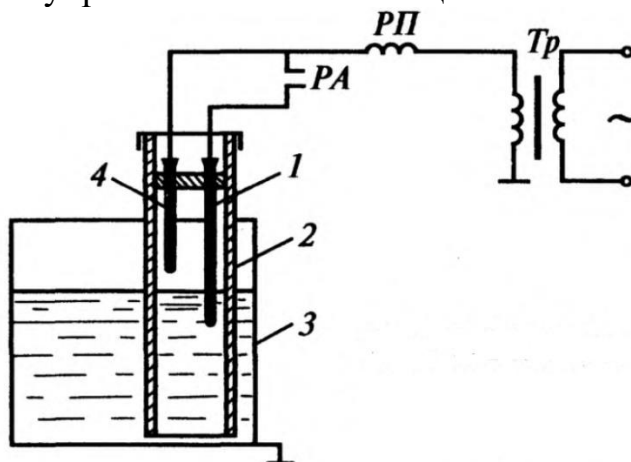


Рисунок 6.2 Схема электродного реле уровня

На рисунке 6.3, а показана схема простейшей насосной установки – дренажного насоса 1, а на рисунке 6.3, б приведена электрическая схема этой установки.

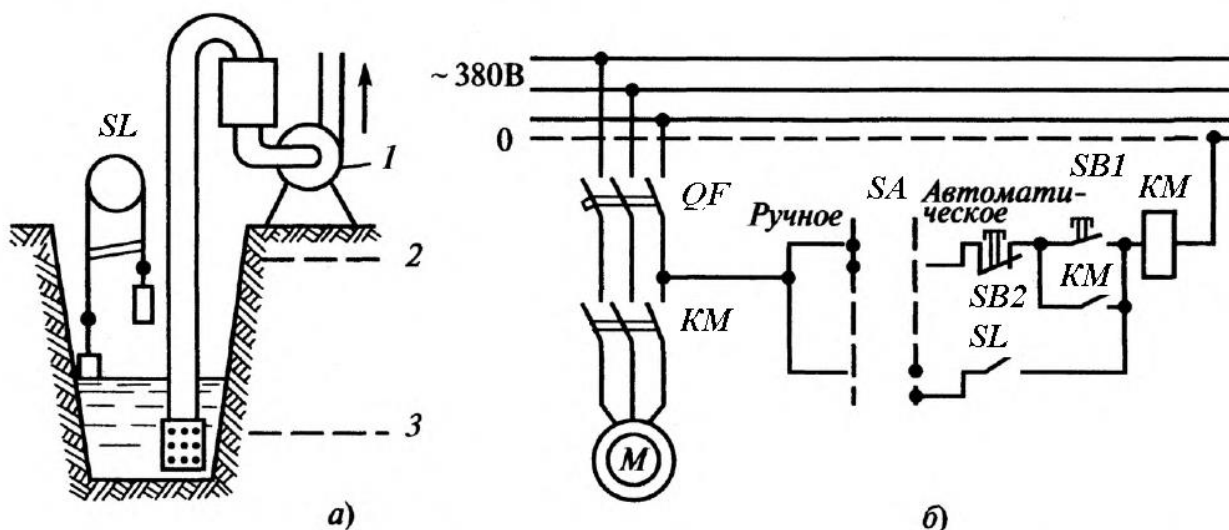


Рисунок 6.3 Конструкция дренажной установки (а) и ее электрическая схема (б)

Ключ управления *SA* имеет два положения: для ручного и автоматического управления. Если *SA* поставлен в положение «Ручное», то управление электродвигателем *M* насоса осуществляется по обычной схеме с помощью кнопок *SB1* и *SB2* магнитного пускателя *KM*. При установке *SA* в положение «Автоматическое» управление двигателем насоса производится от датчика уровня (поплавкового реле) *SL*. При малом уровне воды в дренажном приемнике контакт *SL* разомкнут и насос не включен. При достижении водой верхнего уровня 2 контакт *SL* замыкается и включает пускатель *KM*. Насос начинает работать и откачивать воду. Контакт *SL* поплавкового реле остается замкнутым до тех пор, пока уровень воды не снизится до нижней отметки 3. Тогда контакт *SL* разомкнется, что вызовет отключение пускателя *KM* и остановку двигателя насоса.

Защита электродвигателя *M* от коротких замыканий и перегрузки осуществляется автоматом *QF* с комбинированным расцепителем. Нулевая защита обеспечивается самим магнитным пускателем *KM*. Поплавковое реле уровня *SL* работает здесь без понижающего трансформатора и импульс управления с *SL* передается в схему непосредственно – без промежуточного реле. Такие простейшие схемы применяются при небольшом расстоянии между насосом и местом забора воды, когда падение напряжения в проводах, соединяющих катушку *KM* с поплавковым реле *SL*, незначительно.

#### 6.4 Вопросы для самоконтроля

1. Какими основными параметрами характеризуется работа насосов?
2. Каким образом можно осуществить регулирование подачи?
3. Как рассчитывается мощность на валу насосных установок?

4. Назовите специальные аппараты для автоматизации насосных установок.

5. Каким образом работает схема простейшей насосной установки?

## 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПУСКА АСИНХРОННЫХ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОТ ИСТОЧНИКОВ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ И ВЫРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ С АНАЛИЗОМ ВАРИАНТОВ

Практическое занятие № 7

### 7.1 Пример определения возможности пуска двигателя при питании от сети соизмеримой мощности

*Пример.* Определить возможность пуска наиболее мощного двигателя агрегата витаминной муки АВМ-04 от трансформаторной подстанции. Проверить возможность работы ранее включенных двигателей при пуске наиболее мощного.

*Исходные данные:*

1. Установленная мощность трансформаторной подстанции равна  $S_T = 100$  кВА.

2. Длина соединительной линии  $l = 0,4$  км.

3. Тип и сечение провода: АС-25,  $s = 25$  мм<sup>2</sup>.

4. Напряжение короткого замыкания трансформатора  $U_K = 4,5$  %.

5. Относительное значение избыточного момента  $\mu_{и} = (0,25 \dots 0,3)M_H$ .

6. Момент нагрузки ранее включенных двигателей в относительных единицах  $\mu_{нагр} = 1$ .

7. Технические характеристики электрических двигателей приводов машин агрегата АВМ-0,4 приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 Технические характеристики электрических двигателей приводов  
машин агрегата АВМ-0,4

Наименование машины	Марка электродвигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , мин <sup>-1</sup>	$I_H$ , А	$\eta_H$ , %	$\cos\varphi_H$	$K_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{кр}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
Дробилка	4А180М2С1	30	2930	53,5	90	0,92	7,5	1,4	2,3	0,085	185
Вентилятор большого циклона	4А160S4СУ1	15	1465	29	87,5	0,87	7,5	2	2,3	0,128	135
Измельчитель	4А180S4СУ1	22	1460	43,1	89	0,87	7,5	2	2,3	0,19	175
Вентилятор малого циклона	4А100 L2СУ1	5,5	2880	10,5	87,5	0,91	7,5	2	2,3	0,007	42
Барабан сушилки	4А100S4СУ3	3	1320	6,7	82	0,83	6,5	2	2,4	0,0087	36
Дозатор большого циклона	4А90 L4СУ1	2,2	1420	5	80	0,85	6	2	2,4	0,0056	28,7

Дозатор малого циклона	4A80 A4CY1	1,1	1400	2,75	74,8	0,81	5	2	2,2	0,0033	17,4
Битер транспортера подачи	4A90 L4CY1	2,2	1420	5	80	0,85	6	2	2,4	0,0056	28,7
Шнек готовой продукции	4A90 L4CY1	2,2	1420	5	80	0,85	6	2	2,4	0,0056	28,7
Насос подачи топлива в форсунку	4A71 A2CY1	0,75	2840	1,75	77	0,87	5,5	2	2,2	0,0014	15,1

*Решение:*

Для пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя от источника соизмеримой мощности необходимо выполнить условие

$$\Delta U_{\phi} \leq \Delta U_{д}, \quad (7.1)$$

где  $\Delta U_{\phi}$ ,  $\Delta U_{д}$  - соответственно фактическая и допустимая потери напряжения при пуске двигателя соизмеримой мощности.

Двигатель дробилки имеет мощность, соизмеримую с мощностью источника питания.

Фактическую потерю напряжения определяют по формуле

$$\Delta U_{\phi} = \frac{z_{т} + z_{л}}{z_{т} + z_{л} + z_{дв}} = \frac{0,0716 + 0,508}{0,0716 + 0,508 + 0,548} = 0,514, \quad (7.2)$$

где  $z_{т}$  - полное сопротивление фазы трансформатора при коротком замыкании;

$z_{л}$  - полное сопротивление соединительной линии;

$z_{дв}$  - полное сопротивление запускаемого электродвигателя.

Полное сопротивление фазы трансформатора при коротком замыкании

$$z_{т} = \frac{U_{н.т} \cdot U_{к}}{100I_{н.т}} = \frac{230 \cdot 4,5}{100 \cdot 144,5} = 0,0716 \text{ Ом}, \quad (7.3)$$

где  $U_{н.т}$  - номинальное фазное напряжение трансформатора, В;

$I_{н.т}$  - номинальный фазный ток трансформатора, А.

Полное сопротивление соединительной линии

$$z_{л} = z_0 l = 1,27 \cdot 0,4 = 0,508 \text{ Ом}, \quad (7.4)$$

где  $z_0$  - полное сопротивление 1 км линии, Ом/км;

$l$  - длина линии, км.

Полное сопротивление запускаемого электродвигателя

$$z_{дв} = \frac{U_{н.дв}}{K_i \cdot I_{н.дв}} = \frac{220}{7,5 \cdot 53,5} = 0,548 \text{ Ом}, \quad (7.5)$$

где  $U_{н.дв}$ ,  $I_{н.дв}$  - номинальные напряжение и ток двигателя.

$$I_{н.т} = \frac{s}{\sqrt{3}U_{н.л}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 144,5 \text{ А};$$

$$I_{н.дв} = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_{н.л} \cos\varphi_H \eta_H} = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,92 \cdot 0,9} = 53,5 \text{ А}.$$

Допустимая потеря напряжения

$$\Delta U_{д} = 1 - \sqrt{\frac{\mu_T + \mu_H}{\mu_{п}}} = 1 - \sqrt{\frac{0,1 + 0,3}{1,4}} = 0,466, \quad (7.6)$$

где  $\mu_T = 0,1$  - кратность приведенного момента трогания рабочей машины;

$\mu_H$  - кратность избыточного момента электродвигателя;

$\mu_{п}$  - кратность номинального пускового момента электродвигателя.

Условие (8.1) не выполняется, так как  $0,514 > 0,466$ . С целью выполнения данного условия необходимо сделать следующие мероприятия:

заменить трансформатор на трансформатор большей мощности;

заменить провода соединительной линии на провода с большим сечением;

если установку можно запускать без нагрузки, то использовать электродвигатели с переключением обмоток в период пуска со звезды на треугольник (при напряжении электродвигателей 660/380 В). При этом пусковые ток и момент уменьшаются в три раза.

Рассмотрим случай замены проводов соединительной линии с большим сечением. При этом фактическая потеря напряжения, обусловленная пуском двигателя от источника соизмеримой мощности, равна:

провод АС-35

$$\Delta U_{\phi} = \frac{z_T + z_L}{z_T + z_L + z_{дв}} = \frac{0,0716 + 0,36}{0,0716 + 0,36 + 0,548} = 0,44.$$

Условие пуска в данном случае выполняется.

При пуске асинхронного короткозамкнутого электродвигателя от источника соизмеримой мощности устойчивая работа ранее включенных

двигателей может быть нарушена. В связи с этим для обеспечения устойчивой работы ранее включенных двигателей необходимо выполнить условие

$$\Delta U_{\phi} \leq \Delta U'_{д}, \quad (7.7)$$

где  $\Delta U'_{д}$  - допустимая потеря напряжения при условии устойчивой работы ранее включенных двигателей.

$$\Delta U'_{д} = 1 - \sqrt{\frac{\mu_{нагр}}{\mu_{max}}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{2,2}} = 0,326, \quad (7.8)$$

где  $\mu_{нагр}$  – кратность момента нагрузки ранее включенных двигателей (принимаем, что все они имеют номинальную нагрузку);

$\mu_{max}$  - наименьшая кратность критического момента ранее включенных двигателей.

Для рассматриваемого примера условие (8.7) не выполняется:  $0,514 > 0,326$ .

В связи с этим для выполнения данного условия необходимо **самостоятельно** произвести мероприятия для пуска двигателя дробилки.

## 7.2 Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** Определить возможность пуска электродвигателя дробилки кормов мощностью 30 кВт;  $n_n=2880 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\mu_n=1,4$ ;  $k_i=7,5$ ;  $M_{мп}=0,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , если мощность трансформатора  $S_m=100 \text{ кВА}$ ;  $U_k=4,5\%$ . Питающая линия выполнена проводом А-25 ( $Z_0=0,25 \text{ Ом/км}$ ) длина линии 200 м.

**Задача 2.** Решить предыдущую задачу, но с добавлением еще одного работающего двигателя мощностью 22 кВт,  $\mu_{кр}=2,2$ , параллельно включенного с электродвигателем дробилки кормов, а также определить устойчивость его работы в период пуска электродвигателя дробилки ( $\mu_{нагр} = 1$ ).

## 7.3 Вопросы для самоконтроля

1. Назовите технологические особенности работы электроприводов в АПК.

2. Чем вызвано снижение напряжения при пуске электродвигателей и к чему это может привести?

3. Какое условие должно быть соблюдено для обеспечения запуска АД с короткозамкнутым ротором?

4. Какие мероприятия можно провести для обеспечения запуска АД с короткозамкнутым ротором при питании от сети соизмеримой мощности?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савченко И.П. и др. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве/ П.И.Савченко, И.А.Гаврилюк, И.Н.Земляной и др. – М.: Колос, 1996. – 224 с.
2. Электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных агрегатов и установок/ И.Ф.Кудрявцев, Л.А.Калинин, В.А.Карасенко и др.; под ред. И.Ф.Кудрявцева. –М.: Агропромиздат, 1988. – 480 с.
3. Москаленко В.В. Справочник электромонтера: Справочник/ В.В.Москаленко. –М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 288 с.
4. Епифанов А.П. Основы электропривода: Учебное пособие/ А.П.Епифанов. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 192 с.
5. Аипов Р.С. Электропривод: конспект лекций. Часть I/ Р.С.Аипов. – Уфа.: БГАУ, 2011. - 104 с.
6. Аипов Р.С., Ярмухаметов У.Р. Электропривод: конспект лекций. Часть II/ Р.С.Аипов, У.Р.Ярмухаметов. – Уфа.: БГАУ, 2014. - 102 с.
7. Москаленко В.В. Электрический привод/ В.В.Москаленко. – 5-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 368 с.
8. Соколова Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование/ Е.М.Соколова. – 8-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 224 с.

Приложение 1 Технические данные асинхронных двигателей серии 4А

Тип электро- двигателя	$P_n$ , кВт	$n_n$ , мин <sup>-1</sup>	$I_n$ , А	$\eta_n$	$\cos\varphi_n$	$k_i$	$\mu_n$	$\mu_{мин}$	$\mu_{кр}$	$J_{об}$ , кг·м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4АА63А6У3	0,18	950	0,8	0,56	0,62	3,0	2,2	1,5	2,2	0,0072
4АА63В6У3	0,25	955	1,0	0,59	0,62	3,0	2,2	1,6	2,2	0,0088
4А71А6У3	0,37	960	1,3	0,645	0,69	4,0	2,0	1,8	2,2	0,0068
4А71В6У3	0,55	960	1,7	0,675	0,71	4,0	2,0	1,8	2,2	0,008
4А80А6У3	0,75	965	2,2	0,69	0,74	4,0	2,0	1,6	2,2	0,0124
4А80В6У3	1,1	965	3,0	0,74	0,74	4,0	2,0	1,6	2,2	0,0184
4А90L6У3	1,5	950	1,4	0,75	0,74	4,5	2,0	1,7	2,2	0,0292
4А100L6У3	2,2	950	5,6	0,81	0,73	5,0	2,0	1,6	2,2	0,052
4А112МА6У3	3,0	960	7,4	0,81	0,76	6,0	2,0	1,6	2,5	0,068
4А112МВ6У3	4,0	960	9,2	0,82	0,81	6,0	2,0	1,8	2,5	0,084
4А132S6У3	5,5	965	12,3	0,85	0,80	6,0	2,0	1,8	2,5	0,16
4А132М6У3	7,5	965	16,5	0,55	0,81	6,0	2,0	1,8	2,5	0,232
4А160S6У3	11,0	970	22,6	0,86	0,86	6,0	1,2	1,0	2,0	0,56
4А160М6У3	15,0	970	30,0	0,75	0,87	6,0	1,2	1,0	2,0	0,72
4А180М6У3	18,5	970	36,8	0,88	0,87	6,0	1,2	1,0	2,0	0,88
4А200М6У3	22,0	970	41,4	0,90	0,90	6,5	1,3	1,0	2,4	1,6
4АА56В4У3	0,18	1420	0,67	0,64	0,64	2,5	2,0	1,7	2,2	0,0028
4АА63А4У3	0,25	1450	0,86	0,68	0,65	4,0	2,0	1,5	2,2	0,0048
4АА63В4У3	0,37	1460	1,2	0,68	0,69	4,0	2,0	1,5	2,2	0,0056
4А71А4У3	0,55	1370	1,7	0,705	0,7	4,5	2,0	1,8	2,2	0,0052
4А71В4У3	0,75	1370	2,1	0,72	0,73	4,5	2,0	1,8	2,2	0,0056
4А80А4У3	1,1	1400	2,7	0,75	0,81	5,0	2,0	1,6	2,2	0,012
4А80В4У3	1,5	1400	3,5	0,77	0,83	5,0	2,0	1,6	2,2	0,0132

4A90L4Y3	2,2	1420	5,0	0,80	0,83	6,0	2,1	1,6	2,4	0,0224
4A100S4Y3	3,0	1435	6,7	0,82	0,83	6,0	2,0	1,6	2,4	0,0347
4A100L4Y3	4,0	1430	8,6	0,84	0,84	6,0	2,0	1,6	2,4	0,045
4A112M4Y3	5,5	1445	11,5	0,855	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2	0,07
4A132S4Y3	7,5	1455	15,1	0,875	0,86	7,5	2,2	1,7	3,0	0,11
4A132M4Y3	11,0	1460	22,0	0,875	0,87	7,5	2,2	1,7	3,0	0,16
4A160S4Y3	15,0	1465	29,3	0,855	0,88	7,0	1,4	1,0	2,3	0,41
4A160M4Y3	18,5	1465	35,7	0,895	0,88	7,0	1,4	1,0	2,3	0,51
4A180S4Y3	22,0	1470	41,3	0,90	0,90	6,5	1,4	1,0	2,3	0,76
4A180M4Y3	30,0	1470	56,0	0,91	0,89	6,5	1,4	1,0	2,3	0,93
4A200M4Y3	37,0	1475	68,0	0,91	0,90	7,0	1,4	1,0	2,5	1,47
4AA63B2Y3	0,55	2880	1,3	0,73	0,86	4,5	2,0	1,5	2,2	0,0036
4A71A2Y3	0,75	2830	1,7	0,77	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2	0,0039
4A71B2Y3	1,1	2830	2,5	0,775	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2	0,0044
4A80A2Y3	1,5	2790	3,3	0,81	0,85	6,5	2,1	1,4	2,6	0,0072
4A80B2Y3	2,2	2790	4,6	0,83	0,87	6,5	2,1	1,4	2,6	0,0084
4A90L2Y3	3,0	2820	6,1	0,845	0,88	6,5	2,1	1,6	2,5	0,0140
4A100S2Y3	4,0	2880	7,9	0,865	0,89	7,5	2,0	1,6	2,5	0,0236
4A100L2Y3	5,5	2880	10,0	0,875	0,91	7,5	2,0	1,6	2,5	0,03
4A112M2Y3	7,5	2895	14,8	0,875	0,88	7,5	2,0	1,8	2,8	0,04
4A132M2Y3	11,0	2895	21,2	0,88	0,90	7,5	1,7	1,5	2,8	0,092
4A160S2Y3	15,0	2850	28,5	0,88	0,91	7,0	1,4	1,0	2,2	0,192
4A160M2Y3	18,5	2850	34,6	0,885	0,92	7,0	1,4	1,0	2,2	0,212
4A180S2Y3	22,0	2940	41,7	0,885	0,91	7,5	1,4	1,1	2,5	0,28
4A180M2Y3	30,0	2940	55,0	0,90	0,92	7,5	1,4	1,1	2,5	0,34
4A200M2Y3	37,0	2950	70,0	0,90	0,89	7,5	1,4	1,0	2,5	0,60

Приложение 2 Технические данные асинхронных двигателей серии АИР

Тип электро- двигателя	$P_n$ , кВт	$n_n$ , мин <sup>-1</sup>	$I_n$ , А	$\eta_n$	$\cos\varphi_n$	$k_i$	$\mu_n$	$\mu_{мин}$	$\mu_{кр}$	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР 63А2	0,37	2730	0,9	0,72	0,86	5,0	2,2	1,8	2,2	0,76
АИР 63В2	0,55	2730	1,3	0,755	0,85	5,0	2,2	1,8	2,2	0,90
АИР 71А2	0,75	2820	1,74	0,78	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	0,97
АИР 71В2	1,1	2805	2,5	0,79	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	1,10
АИР 80А2	1,5	2850	3,3	0,81	0,85	7,0	2,1	1,6	2,2	1,80
АИР 80В2	2,2	2850	4,6	0,83	0,87	7,0	2,0	1,6	2,2	2,10
АИР 90L2	3,0	2850	6,12	0,845	0,88	7,0	2,0	1,6	2,2	3,50
АИР 100S2	4,0	2850	8,0	0,87	0,88	7,5	2,0	1,6	2,2	5,90
АИР 100L2	5,5	2850	10,7	0,88	0,89	7,5	2,0	1,6	2,2	7,50
АИР 112M2	7,5	2895	14,8	0,875	0,88	7,5	2,0	1,6	2,2	10
АИР 132M2	11,0	2910	21,0	0,88	0,90	7,5	1,6	1,2	2,2	23
АИР 160S2	15,0	2910	29,0	0,90	0,89	7,0	1,8	1,7	2,7	39
АИР 50А4	0,06	1335	0,28	0,53	0,63	4,5	2,3	1,8	2,2	0,29
АИР 50В4	0,09	1335	0,37	0,57	0,65	4,5	2,3	1,8	2,2	0,33
АИР 56А4	0,12	1335	0,43	0,63	0,66	5,0	2,3	1,8	2,2	0,70
АИР 56В4	0,18	1350	0,63	0,64	0,68	5,0	2,3	1,8	2,2	0,79
АИР 63А4	0,25	1320	0,80	0,68	0,67	5,0	2,3	1,8	2,2	1,20
АИР 63В4	0,37	1320	1,2	0,68	0,70	5,0	2,3	1,8	2,2	1,40
АИР 71А4	0,55	1357	1,7	0,705	0,70	5,0	2,3	1,8	2,2	1,30
АИР 71В4	0,75	1350	2,0	0,73	0,76	5,0	2,2	1,6	2,2	1,40
АИР 80А4	1,1	1395	2,8	0,75	0,081	5,5	2,2	1,6	2,2	9,90
АИР 80В4	1,5	1395	3,5	0,78	0,83	5,5	2,2	1,6	2,2	3,30
АИР 90L4	2,2	1395	5,0	0,81	0,83	6,5	2,1	1,6	2,2	5,60

АИР 100S4	3,0	1410	6,7	0,82	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	8,70
АИР 100L4	4,0	1410	6,5	0,85	0,84	7,0	2,0	1,6	2,2	11,0
АИР 112M4	5,5	1432	11,4	0,855	0,85	7,0	2,0	1,6	2,5	17,0
АИР 132S4	7,5	1440	15,0	0,875	0,86	7,5	2,0	1,6	2,5	28,0
АИР 132M4	11,0	1447	22,2	0,875	0,86	7,5	2,0	1,6	2,7	40,0
АИР 160S4	15,0	1455	28,4	0,90	0,89	7,0	1,9	1,6	2,9	78,0
АИР 160M4	18,5	1455	35,1	0,905	0,89	7,0	1,9	1,6	2,9	100
АИР 180S4	22,0	1462	42,5	0,905	0,87	7,0	1,7	1,5	2,4	150
АИР 180M4	30,0	1470	57,0	0,92	0,87	7,0	1,7	1,5	2,7	190
АИР 63A6	0,18	860	0,78	0,56	0,62	4,0	2,0	1,6	2,2	1,80
АИР 63B6	0,25	860	1,0	0,59	0,62	4,0	2,0	1,6	2,2	2,20
АИР 71A6	0,37	915	1,33	0,65	0,65	4,5	2,0	1,6	2,2	1,70
АИР 71B6	0,55	915	1,74	0,685	0,70	4,5	2,0	1,6	2,2	2,00
АИР 80A6	0,75	920	2,3	0,70	0,72	4,5	2,0	1,6	2,2	3,10
АИР 80B6	1,1	920	3,3	0,74	0,74	4,5	2,0	1,6	2,2	4,60
АИР 90L6	1,5	925	4,2	0,76	0,72	6,0	2,0	1,6	2,2	7,30
АИР 100L6	2,2	945	5,4	0,81	0,74	6,0	2,0	1,6	2,2	13,0
АИР112МА6	3,0	950	7,4	0,81	0,76	6,0	2,0	1,66	2,2	17,0
АИР 112МВ6	4,0	950	9,1	0,82	0,81	6,0	2,0	1,6	2,2	21,0
АИР 132S6	5,5	960	11,0	0,85	0,80	7,0	2,0	1,66	2,2	40,0
АИР 132M6	7,5	960	16,5	0,855	0,81	7,0	2,0	1,6	2,2	58,0
АИР 160S6	11,0	970	23,0	0,88	0,83	6,5	2,0	1,6	2,7	120
АИР 160M6	15,0	970	30,5	0,88	0,85	6,5	2,0	1,6	2,7	150
АИР 180M6	18,5	980	38,6	0,895	0,85	6,5	1,8	1,6	2,4	200
АИР 200M6	22,0	980	46,4	0,90	0,83	6,5	1,6	1,4	2,4	360
АИР 200L6	30,0	975	58,5	0,90	0,85	6,5	1,6	1,4	2,4	400

Приложение 3 Технические характеристики предохранителей серии НПН,  
ПР-2 и ПН2

Тип	Номинальный ток, А		Предельный ток отключения при напряжении до 500 В, А
	предохранителя	плавких вставок	
НПН15	15	2; 4; 6; 8; 10; 16	10 000
ПР-2-15	15	6; 8; 10; 16	7 000
НПН60М	60	20; 25; 31,5; 40; 50; 60	
ПР-2-60	60	20; 25; 31,5; 40; 50; 60	3 500
ПН2-100	100	31,5; 40; 50; 60; 80; 100	50 000
ПР-2-100	100	60; 80; 100	
ПР-2-200	200	100; 125; 160; 200	10 000
ПН2-250	250	80; 100; 125; 160; 200; 250	40 000
ПР-2-350	350	200; 250; 300; 350	11 000
ПН2-400	400	200; 250; 300; 350; 400	25 000
ПН2-600	600	300; 400; 500; 600	25 000
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	
ПН2-1000	1000	500; 600; 750; 800; 1000	10 000
ПР-2-1000	1000	600; 700; 850; 1000	20 000

Приложение 4 Технические характеристики автоматических выключателей  
серии АЕ2000 и АЕ2000М

Тип	Номинальный ток, А	Вид расцепителя	Номинальный ток расцепителей, А
АЕ2013	10	электромагнитный	0,32; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 6,3; 8,0; 10
АЕ2016		комбинированный	

AE2023	16	электромагнитный	0,32; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0;
AE2026		комбинированный	1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5; 16
AE2033	25	электромагнитный	0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0;
AE2036		комбинированный	2,5; 3,2; 4,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5; 16; 20; 25
AE2043	63	электромагнитный	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40;
AE2044		комбинированный	50; 63
AE2053M	100	электромагнитный	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40;
AE2056M		комбинированный	50; 63; 80; 100
AE2063	160	электромагнитный	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40;
AE2066		комбинированный	50; 63; 80; 100; 126; 160

#### Приложение 5 Технические характеристики тепловых реле РТЛ

Тип	Номинальный ток, А	Диапазон регулирования тока уставки, А	Мощность двигателя, кВт, при $U_n$ , В	
			380	660
РТЛ-1001	25	0,1...0,17		
РТЛ-1002		0,16...0,26		
РТЛ-1003		0,24...0,4		
РТЛ-1004		0,38...0,67	0,37	
РТЛ-1005		0,61...1,0	0,75	
РТЛ-1006		0,95...1,6	0,75	1,1
РТЛ-1007		1,5...2,6	0,75	1,5
РТЛ-1008		2,4...4,0	1,5	3,0
РТЛ-1010		3,8...6,0	2,2	4,0
РТЛ-1012		5,5...8,0	3,0	5,5
РТЛ-1014		7,0...10,0	4,0	7,5
РТЛ-1016		9,5...14,0	5,5	10

РТЛ-1021		13,0...19,0	7,5	15,0
РТЛ-1022	25	18,0...25,0	11,0	18,5
РТЛ-2053	80	23,0...32,0	15,0	22,0
РТЛ-2055		30,0...41,0	18,5	30,0
РТЛ-2057		38,0...52,0	22,0	37,0
РТЛ-2059		47,0...64,0	25,0	45,0
РТЛ-2061		54,0...74,0	30,0	55,0
РТЛ-2063	80	63,0...86,0	37,0	75,0

Приложение 6 Технические характеристики магнитных пускателей ПМЕ, ПМА, ПМЛ и ПМ12

Тип	Номинальный ток, А	Мощность двигателя при напряжении, В		Тип встраиваемого теплового реле	Номинальный ток теплового реле
		220	380		
ПМЕ-000	3,0	0,6	1,1	ТРН-10А	3,2
ПМЕ-100	10,0	2,2	4,0	ТРН-10	10
ПМЕ-200	23,0	5,5	10,0	ТРН-25	25
ПМА-2000	23,0	5,5	11,0	РТТ-14	25
				РТТ-14Б	
ПМА-3000	36,0	11,0	18,5	РТТ-21	63
				РТТ-21Б	
ПМА-4000	60,0	18,5	30,0	РТТ-21	63
				РТТ-21Б	
ПМА-5000	95,0	30,0	45,0	РТТ-31	160
				РТТ-31Б	
ПМА-6000	150,0	45,0	75,0	РТТ-31	160
				РТТ-31Б	
ПМЛ-1000	10,0	2,2	4,0	РТЛ-1000	25
ПМЛ-2000	25,0	5,5	11,0	РТЛ-1000	25
ПМЛ-3000	40,0	11,0	18,5	РТЛ-2000	80
ПМЛ-4000	63,0	18,5	30,0	РТЛ-2000	80
ПМЛ-5000	80,0	30,0	37,0	РТЛ-2000	80
ПМЛ-6000	100,0	37,0	45,0	РТЛ-3000	125
ПМЛ-7000	160,0	45,0	75,0	РТЛ-3000	200
ПМ12-010	10,0	2,2	4,0	РТТ 5-10	10
ПМ12-025	25,0	5,5	11,0	РТТ 131	25
ПМ12-040	40,0	11,0	18,5	РТТ 121	40
ПМ12-063	63,0	18,5	30,0	РТТ 231	80
ПМ12-100	100,0	30,0	37,0	РТТ 311	100