



**УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**



**А. П. КОЛОМИЕЦ, Н. П. КОНДРАТЬЕВА,
И. Р. ВЛАДЫКИН, С. И. ЮРАН**

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Допущено Министерством сельского хозяйства
Российской Федерации в качестве учебника для
студентов высших учебных заведений, обучаю-
щихся по специальности 311300 «Механизация
сельского хозяйства»

000019 А-199



МОСКВА «КолосС» 2008

UDK ~~631.3(075.8)~~
ББК ~~40.71я73~~
~~К61~~
Э45

Рецензент доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированного электропривода МГАУ им. В. П. Горячкина *А. И. Учеваткин*

Редактор *Г. В. Лихачева*

Коломиец А. П., Кондратьева Н. П., Владыкин И. Р., Юран С. И.

К61 Электропривод и электрооборудование. — М.: КолосС, 2008. — 328 с.: ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
ISBN 978—5—9532—0596—2

Обобщены основные положения электропривода и электрооборудования в сельском хозяйстве. Подробно рассмотрены электротехнологии, используемые в сельскохозяйственном производстве, электрооборудование сельскохозяйственной техники и ремонтного производства, автоматизация сельскохозяйственных технологических и рабочих процессов машин.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Механизация сельского хозяйства».

Учебное издание

УДК 631.3(075.8)

ББК 40.71я73

**Коломиец Алексей Петрович, Кондратьева Надежда Петровна,
Владыкин Иван Ревович, Юран Сергей Иосифович**

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Учебник для вузов

Художественный редактор *В. А. Чуракова*
Компьютерная верстка *В. А. Маланичевой*
Компьютерная графика *М. Л. Бухаревой*
Корректор *В. Г. Лузгина*

Подписано в печать 04.06.08. Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Ньютон. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,09. Изд. № 023.
Тираж 30 000 экз. (3-й завод: 3001—4500 экз.) Заказ № 1286

ООО «Издательство «КолосС», 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 17.
Почтовый адрес: 129090, Москва, Астраханский пер., д. 8.
Тел. (495) 680-99-86, тел./факс (495) 680-14-63,
e-mail: sales@koloss.ru, наш сайт: www.koloss.ru

ISBN 978-5-9532-0596-2



Отпечатано с готовых диапозитивов
в ОАО «Марийский полиграфическо-издательский комбинат»
424002, г. Йошкар-Ола, ул. Комсомольская, 112

9 785953 205962

*Оригинал-макет книги является собственностью издательства «КолосС»,
и его воспроизведение в любом виде, включая электронный,
без согласия издателя запрещено.*

ISBN 978—5—9532—0596—2

© Издательство «КолосС», 2006

1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для того чтобы понять, что такое привод, изобразим в виде структурной схемы производственный агрегат, или машинное устройство (рис. 1.1).

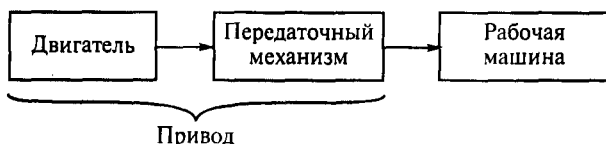


Рис. 1.1. Структурная схема производственного агрегата

Из рисунка 1.1 видно, что привод включает в себя двигатель и передаточное устройство. В качестве двигателя используют устройство, преобразующее энергию ветра, воды, пара, двигатель внутреннего сгорания и т. д. Если используют электрический двигатель, то имеет место электрический привод.

Передаточный механизм, предназначенный для передачи движения от двигателя к рабочей машине, выполняют в виде валов, шкивов, ременной передачи, зубчатых колес, муфт и т. д.

Следовательно, *привод — это часть производственного механизма, которая создает и передает движение к рабочей машине.*

Если в структурную схему (см. рис. 1.1) включим звенья, осуществляющие автоматическое управление, то получим производственный агрегат с автоматизированным электроприводом (рис. 1.2).

Таким образом, *автоматизированный электропривод — это часть производственного механизма, состоящая из электрического двигателя, передаточного механизма, аппаратуры управления, которая создает, передает движение к рабочей машине и управляет этим движением.*

На рисунке 1.3 приведена классификация электроприводов.

Историческая справка. В XIX в. учеными М. Фарадеем, Б. С. Якоби, М. О. Дольво-Добровольским были сделаны открытия, которые позволили использовать электрическую энергию в производственных целях. Так, в 1821 г. Фарадей открыл

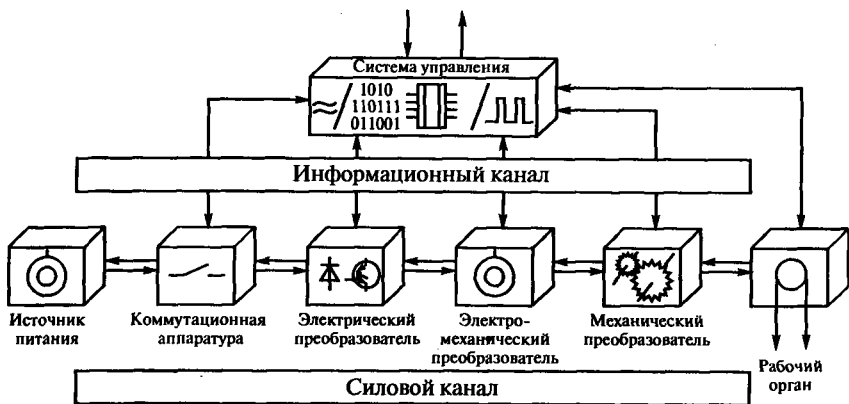


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема производственного агрегата с автоматизированным электроприводом

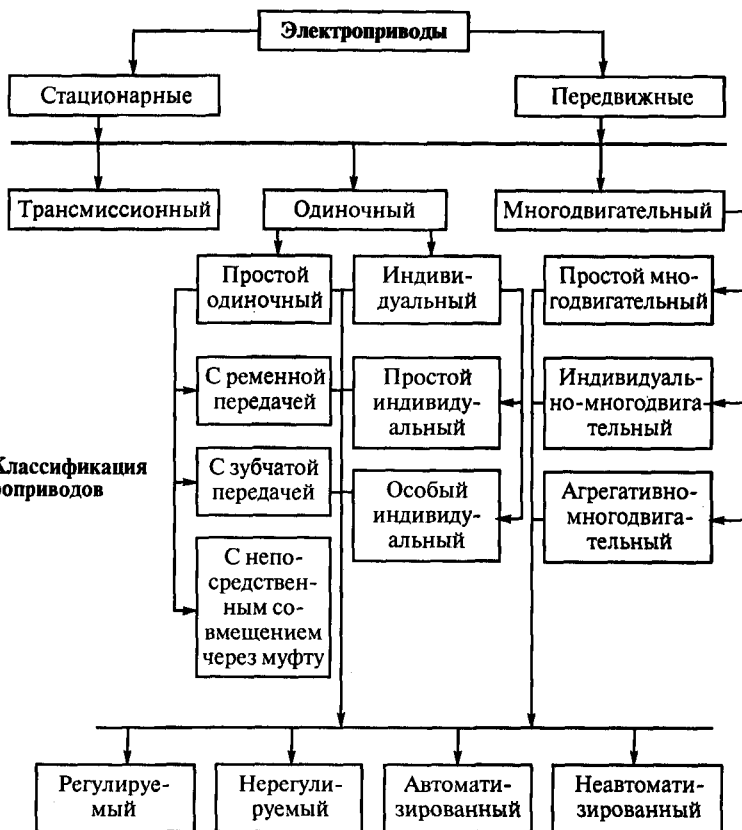


Рис. 1.3. Классификация электроприводов

явление вращения проводника с током вокруг полюса постоянного магнита. Он создал лабораторную модель будущего электродвигателя.

В 1834 г. академик Б. С. Якоби изобрел двигатель постоянного тока с вращающимся валом, получавший питание от гальванической батареи.

В 1838 г. двигатель академика Б. С. Якоби был использован для привода гребного колеса прогулочного катера царской семьи. Этот первый электропривод не нашел практического применения ввиду несовершенства самого двигателя и питающей батареи. Несмотря на это *1838 год* считают годом *создания электропривода*.

В период с 1889 по 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский создал систему трехфазного электрического двигателя. Это привело к широкому применению электропривода в промышленности и в сельском хозяйстве.

1.2. ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Электропривод широко используют во всех отраслях народного хозяйства. Он один из энергоемких потребителей и преобразователей энергии. В связи с этим вопросы, связанные с повышением коэффициента полезного действия за счет уменьшения потерь при преобразовании энергии, в настоящее время весьма актуальны. Для снижения потерь необходимо правильно согласовать параметры электропривода с параметрами рабочей машины.

Широкое использование электропривода объясняется возможностью преобразования электрической энергии в другие виды энергий, большим диапазоном мощности и скорости движения, экологической чистотой, разнообразием конструктивного исполнения, что позволяет рационально соединять привод с органами рабочей машины и использовать его в самых сложных условиях.

Основная тенденция развития современного электропривода — дальнейшая его автоматизация в целях интенсификации управления технологическими процессами.

Возможности современного электропривода постепенно расширяются за счет развития электроники, вычислительной техники, автоматики и механики.

1.3. ПОНЯТИЕ О МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Механической характеристикой рабочей машины или двигателя называют зависимость угловой скорости (ω) от момента вращения (M). Таким образом, для рабочей машины эта зависимость имеет вид: $\omega_{р.м} = f(M_{р.м})$, для электрического двигателя: $\omega_{дв} = f(M_{дв})$. Единица момента вращения — ньютон-метр (Н·м), угловой скорости — радиан на секунду (рад/с).

1.3.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

В общем виде механическую характеристику рабочей машины описывают эмпирическим выражением:

$$M_c = M_{тр} + (M_{с.ном} - M_{тр}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.р.м}} \right)^X, \quad (1.1)$$

где M_c — момент сопротивления рабочей машины при ее угловой скорости, равной ω ; $M_{тр}$ — момент трогания рабочей машины, соответствующий ее угловой скорости, равной нулю ($\omega = 0$); $M_{с.ном}$ — номинальный момент сопротивления рабочей машины, соответствующий ее угловой скорости, равной номинальной ($\omega_{ном}$); ω — текущая угловая скорость рабочей машины; $\omega_{ном.р.м}$ — номинальная угловая скорость рабочей машины; X — показатель степени.

Условно все рабочие машины разбиты на четыре группы. Поэтому показатель степени X принимает обычно четыре значения, равные 0; 1; 2 и -1 . Рассмотрим механические характеристики для каждой группы рабочих машин.

Механические характеристики рабочих машин при $X = 0$. Подставляя значение $X = 0$ в формулу (1.1), получаем

$$M_c = M_{тр} + (M_{с.ном} - M_{тр}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.р.м}} \right)^0 = M_{с.ном}. \quad (1.2)$$

Из выражения (1.2) следует, что момент рабочих машин не зависит от угловой скорости и равен номинальному моменту (рис. 1.4).

К рабочим машинам, имеющим механическую характеристику такого вида, относят ленточные транспортеры, подъемные лебедки, краны, тельферы и т. д.

Механические характеристики рабочих машин при $X = 1$. Подставляя значение $X = 1$ в формулу (1.1) и выделяя составляющие, не зависящие от угловой скорости ω , получаем

$$M_c = M_{тр} + (M_{с.ном} - M_{тр}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.р.м}} \right)^1 = \\ = M_{тр} + \frac{M_{с.ном} - M_{тр}}{\omega_{ном.р.м}} \omega = A + B\omega, \quad (1.3)$$

$$\text{где } A = M_{тр}, \text{ а } B = \frac{M_{с.ном} - M_{тр}}{\omega_{ном.р.м}}.$$

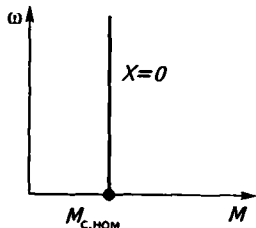


Рис. 1.4. Механическая характеристика рабочей машины при $X = 0$

Из формулы (1.3) следует, что зависимость между угловой скоростью и моментом прямо пропорциональна (рис. 1.5).

К рабочим машинам, имеющим механическую характеристику такого вида, относят зерноочистительные машины, генераторы постоянного тока независимого возбуждения и т. д.

Механические характеристики рабочих машин при $X = 2$. Эта единственная механическая характеристика, которая имеет свое название — «вентиляторная». Подставляя значение $X = 2$ в формулу (1.1), получаем

$$\begin{aligned} M_c &= M_{\text{тр}} + (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.р.м}}} \right)^2 = \\ &= M_{\text{тр}} + \frac{M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}}{(\omega_{\text{ном.р.м}})^2} \omega^2 = A + B\omega^2, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где $A = M_{\text{тр}}$, а $B = \frac{M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}}{(\omega_{\text{ном.р.м}})^2}$.

Из формулы (1.4) следует, что зависимость между угловой скоростью и моментом имеет более сложный вид (рис. 1.6).

К рабочим машинам, имеющим механическую характеристику такого вида, относят вентиляторы, центробежные насосы, сепараторы и т. д.

Механические характеристики рабочих машин при $X = -1$. Подставляя значение $X = -1$ в формулу (1.1), получаем

$$\begin{aligned} M_c &= M_{\text{тр}} + (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном.р.м}}} \right)^{-1} = \\ &= M_{\text{тр}} + \frac{M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}}{\omega} \omega_{\text{ном.р.м}} = A + \frac{\Gamma}{\omega}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где $A = M_{\text{тр}}$, а $\Gamma = (M_{\text{с.ном}} - M_{\text{тр}}) \omega_{\text{ном.р.м}}$.

Из формулы (1.5) следует, что зависимость между угловой скоростью и моментом обратно пропорциональна (рис. 1.7).

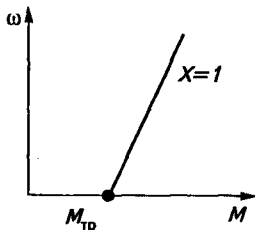


Рис. 1.5. Механическая характеристика рабочей машины при $X = 1$

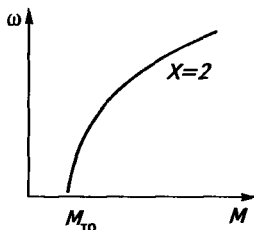


Рис. 1.6. Механическая характеристика рабочей машины при $X = 2$

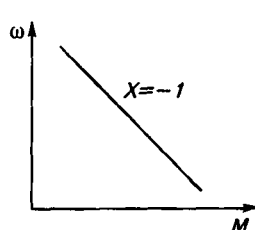


Рис. 1.7. Механическая характеристика рабочей машины при $X = -1$

К рабочим машинам, имеющим механическую характеристику такого вида, относят зерновые норрии.

1.3.2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Различают *естественную* и *искусственные* механические характеристики электрических двигателей. Механическую характеристику электрического двигателя считают естественной, если выполняются сразу три условия:

электрический двигатель подключен к сети с номинальными параметрами;

двигатель включен по схеме, на которую он разработан;

отсутствуют добавочные сопротивления в обмотках двигателя.

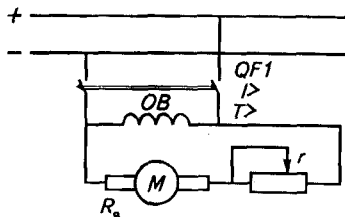
При невыполнении хотя бы одного из перечисленных условий двигатель работает на искусственной механической характеристике.

1.3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

На рисунке 1.8 приведена электрическая схема включения двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. Двигатель называют так потому, что обмотка возбуждения включена параллельно якорной обмотке. Ток обмотки возбуждения для двигателей мощностью до 10 кВт составляет (5...10 %) от номинального тока двигателя.

Напряжение, прикладываемое к двигателю, расходуется на создание электродвижущей силы [ЭДС (E)] и на падение напряжения в обмотке якоря ($I R_{\text{я}}$):

$$U_{\text{ном}} = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (1.6)$$



где $I_{\text{я}}$ — ток в цепи якоря двигателя, А.

С учетом того, что ЭДС зависит от угловой скорости двигателя ($E = k_{\phi} \omega$), формула (1.6) примет вид:

$$U_{\text{ном}} = k \Phi_{\text{ном}} \omega + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (1.7)$$

Рис. 1.8. Электрическая схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

$R_{\text{я}}$ — сопротивление якоря ДПТ ПВ

где k — коэффициент, зависящий от конструктивных данных электродвигателя; $\Phi_{\text{ном}}$ — номинальный магнитный поток, Вб.

Отсюда получаем уравнение электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{НОМ}}} \quad (1.8)$$

Ввиду того, что момент, развиваемый двигателем, пропорционален току ($M = k\Phi I$), то выражение (1.8) примет вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k\Phi_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{НОМ}})^2} M. \quad (1.9)$$

Уравнением (1.9) выражена механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

В уравнении (1.9) отношение $U_{\text{НОМ}}/k\Phi_{\text{НОМ}}$ равно угловой скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{0\text{х.х}} = U_{\text{НОМ}}/k\Phi_{\text{НОМ}}. \quad (1.10)$$

Из выражения (1.7) следует, что при угловой скорости, равной нулю, ток двигателя принимает максимальное значение, которое соответствует пусковому току:

$$I_{\text{я}} = U/R_{\text{я}} = I_{\text{пуск}}.$$

Например, для машины постоянного тока параллельного возбуждения, номинальная мощность которой 1,5 кВт, номинальный ток 8,65 А, сопротивление якоря 2 Ом, напряжение 220 В, пусковой ток составляет около 110 А, что больше номинального более чем в 10 раз. Поэтому при пуске двигателей необходимо вводить дополнительные сопротивления для ограничения пускового тока.

Из выражения (1.9) следует, что при угловой скорости, равной нулю, момент двигателя принимает максимальное значение, которое соответствует пусковому моменту:

$$M = M_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{НОМ}} k\Phi_{\text{НОМ}}}{R_{\text{я}}} = M_{\text{пуск}}. \quad (1.11)$$

Из уравнения (1.9) видно, что графически связь между угловой скоростью (ω) и моментом (M) представляет собой прямую линию, для построения которой достаточно найти две точки.

1.3.4. ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ

В паспортных данных двигателя или на его щитке указаны следующие технические данные: номинальная мощность ($P_{\text{НОМ}}$), номинальное напряжение ($U_{\text{НОМ}}$), номинальный ток ($I_{\text{НОМ}}$), номинальная частота вращения ($n_{\text{НОМ}}$). По этим данным необходимо построить механическую характеристику по двум точкам (рис. 1.9).

Координаты *первой точки 1*: момент равен нулю ($M = 0$); угловая скорость соответствует угловой скорости идеального холостого хода ($\omega = \omega_{0\text{х.х}}$), которую определяют по выражению (1.10). Коэффициент $k\Phi_{\text{НОМ}}$ находят по выражению (1.7) для $\omega = \omega_{\text{НОМ}}$:

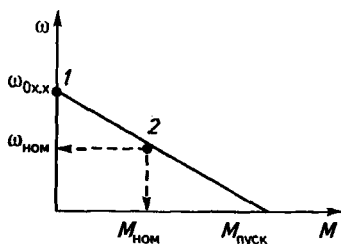
$$k\Phi_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \approx \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{0,105n_{\text{НОМ}}}, \quad (1.12)$$

где $\omega_{\text{НОМ}}$ и $n_{\text{НОМ}}$ — угловая скорость, рад/с, и частота вращения электродвигателя, мин⁻¹ (обороты в минуту), соответственно $\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30} = 0,105n_{\text{НОМ}}$.

Координаты *второй точки 2*: момент равен номинальному ($M = M_{\text{НОМ}}$); угловая скорость равна номинальной ($\omega = \omega_{\text{НОМ}}$).

Номинальная угловая скорость, рад/с,

$$\omega_{\text{НОМ}} \approx 0,105n_{\text{НОМ}}, \quad (1.13)$$



где $n_{\text{НОМ}}$ — номинальная частота вращения электродвигателя, паспортная величина, мин⁻¹.

Рис. 1.9. Построение естественной механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по каталожным данным (по двум точкам):

$\omega_{0\text{х.х}}$ — угловая скорость идеального холостого хода; $\omega_{\text{НОМ}}$ — номинальная угловая скорость двигателя; $M_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{пуск}}$ — соответственно номинальный и пусковой моменты двигателя

Номинальный момент

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}}/\omega_{\text{НОМ}}, \quad (1.14)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность электродвигателя, Вт.

1.3.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Электрические машины постоянного тока параллельного возбуждения могут работать как в двигательном, так и в следующих тормозных режимах:

- генераторное (рекуперативное) торможение;
- динамическое торможение;

торможение противовключением за счет изменения полярности напряжения на зажимах работающего двигателя или за счет введения в цепь якоря большого добавочного сопротивления.

При этом надо помнить, что электрическая машина работает в двигательных режимах (прямого или обратного вращения), если знаки угловой скорости и момента совпадают (рис. 1.10).

Если знаки момента и угловой скорости не совпадают, то электрическая машина работает в тормозном режиме (см. рис. 1.10).

Механические характеристики электрической машины постоянного тока параллельного возбуждения в *двигательном режиме* описывают выражением (1.9), они показаны на рисунке 1.11.

В режиме *генераторного (рекуперативного) торможения* направление угловых скоростей двигателя и рабочей машины совпадает. Благодаря этому рабочая машина разгоняет электрическую машину до скорости выше скорости идеального холостого хода. Поэтому электрическая машина превращается в генератор и отдает электрическую энергию в сеть. Этот режим используют при обкатке двигателей внутреннего сгорания (ДВС) после ремонта: сначала электрический двигатель вращает ДВС и происходит режим «холодной обкатки», а затем включается ДВС, который вращает электрическую машину со скоростью выше скорости идеального холостого хода, т. е. происходит режим «горячей обкатки». Пример такого режима — движение трамвая с горки. В этом случае

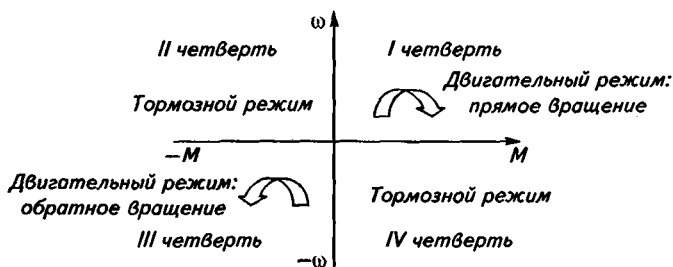


Рис. 1.10. Расположение механических характеристик электрических машин в двигательном и тормозных режимах работы по четвертям

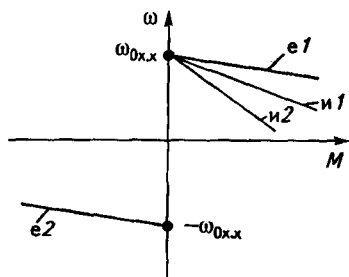


Рис. 1.11. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при прямом и обратном вращении двигателя:

e_1, e_2 — естественные характеристики при прямом и обратном вращении двигателя соответственно; i_1 — первая искусственная характеристика, полученная за счет введения $R_{доб1}$; i_2 — вторая искусственная характеристика, полученная за счет введения $R_{доб2}$; $R_{доб2} > R_{доб1}$

необходимо трамвай притормаживать для того, чтобы он не разогнался.

Механические характеристики в рекуперативном режиме работы приведены на рисунке 1.12.

В режиме *динамического торможения* происходит плавное торможение электропривода в соответствии с требованиями технологического процесса. Характерная точка этого режима — точка с координатами $[M = 0 \text{ и } \omega = 0]$.

На рисунке 1.13 изображены электрические схемы динамического торможения.

Механические характеристики в режиме динамического торможения приведены на рисунке 1.14.

В режиме *торможения противовключением* на статор двигателя подается напряжение, обеспечивающее вращение якоря в одну сторону, но под действием внешних сил якорь вращается в другую сторону. Проиллюстрируем это рисунком 1.15.

Из рисунка 1.15 видно, что моменту сопротивления рабочей машины $M_{с1}$ соответствует рабочая точка 1. В этом случае угловая скорость вала двигателя составляет ω_1 . При увеличении момента сопротивления до значения $M_{с2}$ угловая скорость вала двигателя

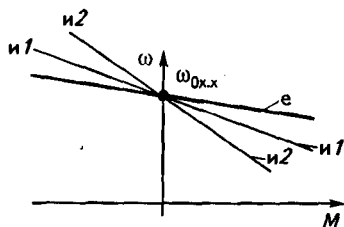


Рис. 1.12. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения в режиме генераторного (рекуперативного) торможения:

e — естественная характеристика; i_1 — первая искусственная характеристика, полученная за счет введения $R_{доб1}$; i_2 — вторая искусственная характеристика, полученная за счет введения $R_{доб2}$; $R_{доб2} > R_{доб1}$

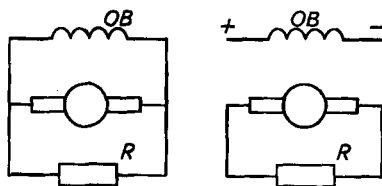


Рис. 1.13. Электрические схемы работы ДПТ в режиме динамического торможения

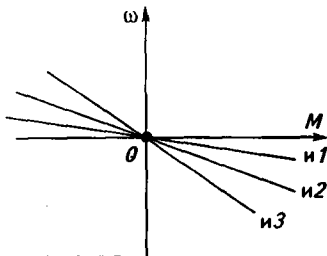


Рис. 1.14. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения в режиме динамического торможения:

и1 и2, и3 — искусственные характеристики

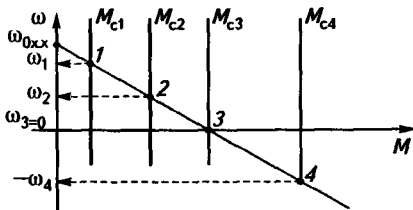


Рис. 1.15. Изменения направления вращения якоря в зависимости от нагрузки на валу:

M_c — момент сопротивления рабочей машины

уменьшается до значения ω_2 , что соответствует рабочей точке 2. При дальнейшем увеличении момента сопротивления до значения M_{c3} двигатель вынужден остановиться ($\omega = 0$), а при возрастании нагрузки до значения M_{c4} происходит изменение направления его вращения ($-\omega_4$), и в этом случае электрическая машина начинает работать в режиме противовключения.

Режим противовключения используют для аварийной (мгновенной) остановки электропривода. Его осуществляют двумя способами: за счет введения в цепь якоря большого добавочного сопротивления (рис. 1.16) или изменения полярности напряжения у работающего двигателя (рис. 1.17).

В режиме противовключения направления моментов электрической и рабочей машин пр о т и в о п о л о ж н ы.

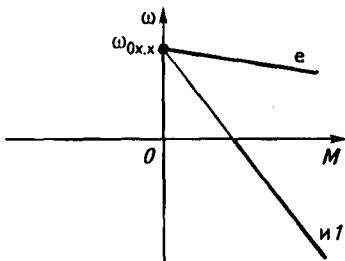


Рис. 1.16. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения в режиме торможения противовключением за счет введения в цепь якоря большого добавочного сопротивления:

е — естественная характеристика; и1 — искусственная характеристика, полученная за счет введения $R_{доб1} \gg R_a$; и1 (жирная часть) — режим противовключения, получаемый за счет введения в цепь ротора большого добавочного сопротивления

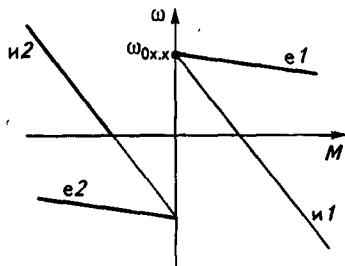


Рис. 1.17. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения в режиме торможения противовключением за счет изменения полярности напряжения у работающего двигателя:

е1, е2 — естественные характеристики при прямом и обратном вращении; и2 (жирная часть) — противовключение за счет изменения полярности напряжения у работающего двигателя

1.3.6. ИСПОЛНЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ПОСТРОЕНИЕ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ

Исполнение асинхронного двигателя. В настоящее время наиболее распространены асинхронные двигатели серий 4А, 5А и АИР. Электродвигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы соответствующими типами электродвигателей серий 4А, АИР. На рисунке 1.18 приведены расшифровки обозначения двигателей серии АИР.

В условном обозначении электродвигателей сельскохозяйственного исполнения добавляют букву С после обозначения числа полюсов, например 4А90L2СУ1, а в обозначениях электродвигателей сельскохозяйственного исполнения со встроенной температурной защитой добавляют букву В (4А90L2ВСУ1).

В зависимости от назначения все электротехнические изделия различают по климатическому исполнению и категории размещения (табл. 1.1).

1.1. Климатические исполнения электротехнических изделий

Буквенное обозначение		Климатическое исполнение
русские	латинские	
У	n	Для умеренного климата
УХЛ	nf	Для умеренного и холодного климата
Т	t	Для сухого и влажного тропического климата
М	m	Для умеренно холодного морского климата
ОМ	mv	Для умеренно холодного и тропического морского климата
СХ	—	Сельскохозяйственного назначения
Х	—	Для работы в химически агрессивной среде

В зависимости от места установки выделяют следующие категории размещения электрооборудования (табл. 1.2).

АИР XXXX В СУ2

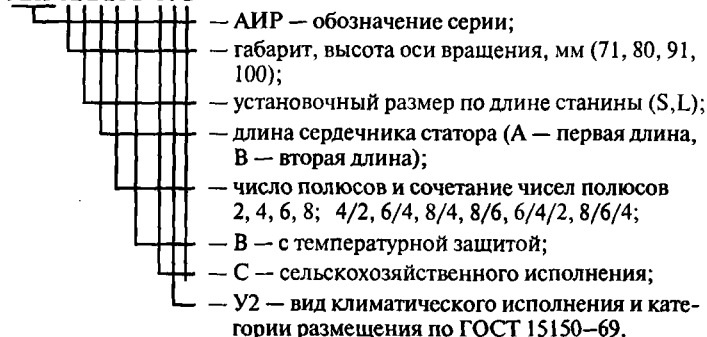


Рис. 1.18. Структура условного обозначения асинхронных двигателей серии АИР

1.2. Обозначение мест установки электротехнических изделий

Обозначение	Место установки
1	На открытом воздухе
2	Под навесом или в открытом помещении
3	В закрытых помещениях без искусственного микроклимата
4	В помещениях с искусственным микроклиматом
5	В помещениях с повышенной влажностью

Все электротехнические изделия, в том числе и электродвигатели, классифицируют по степени защиты от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями и от попадания внутрь оболочек изделия посторонних тел и воды (IPXX — International Protection) (табл. 1.3 и 1.4).

1.3. Значение первой цифры в обозначении IP

Первая цифра	Защита
0	Отсутствует
1	От проникновения внутрь оболочки твердых тел размером свыше 50 мм (например, рук человека)
2	От предметов размером около 12 мм (например, пальцев человека)
3	От твердых тел размером более 1,0 мм
4	От твердых тел размером менее 1,0 мм
5	От пыли в количестве, нарушающем работу устройства
6	Полная пыленепроницаемость

1.4. Значение второй цифры в обозначении IP

Вторая цифра	Защита
0	Отсутствует
1	От вертикальных капель воды
2	От капель воды при наклоне до 15°
3	От капель дождя под углом 60° от вертикали
4	От брызг в любом направлении
5	От водяных струй в любом направлении
6	От волн воды
7	При погружении в воду
8	При длительном погружении в воду

Электродвигатели серии 4А с повышенным пусковым моментом используют для привода механизмов, имеющих статические и инерционные нагрузки в момент пуска. В отличие от электродвигателей основного исполнения роторы данных двигателей имеют двойную клетку, залитую алюминием, обеспечивающую повышение пускового момента и снижение пускового тока.

Двигатели асинхронные АИР100СУ2 основного использования и модификации: многоскоростные, со встроенной температурной защитой и их сочетания, предназначены для эксплуата-

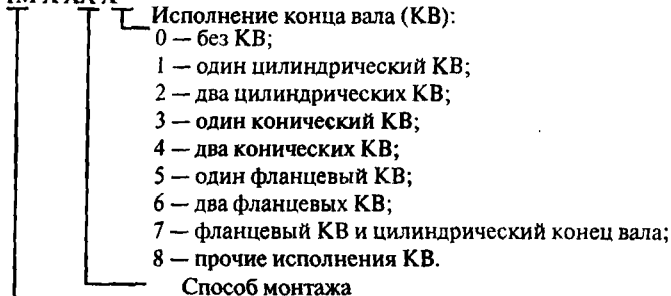
ции специально в сельском хозяйстве, где повышена влажность, агрессивная среда и т. д., и работают от сети переменного тока частотой 50 Гц. Двигатели с температурной защитой относят к изделиям автоматизированным с применением микропроцессорной техники.

Двигатели пригодны для эксплуатации в условиях У5. Номинальный режим работы S1 по ГОСТ 183—74. Конструктивное исполнение по способу монтажа приведено на рисунке 1.19.

1.5. Конструктивное исполнение двигателей серии АИР по способу монтажа (ГОСТ 2479—79)

Тип и размер двигателя	Исполнение по способу монтажа
АИР71	IM1081, IM1082
АИР80	IM2081, IM2082
АИР90	IM3041, IM3042
АИР100	IM3641, IM3642

IM XXXX



Конструктивное исполнение:

- 1 — на лапах с подшипниковыми щитами, с пристроенным редуктором;
- 2 — то же, но с фланцев на подшипниковом щите (или щитах);
- 3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите, с цокольным фланцем;
- 4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 — без подшипниковых щитов;
- 6 — на лапах с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками;
- 7 — на лапах со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 — с вертикальным валом;
- 9 — специального исполнения по способу монтажа, например встраиваемые.

Рис. 1.19. Структурная формула исполнения двигателя по способу монтажа

Построение механических характеристик асинхронного двигателя. Механическую характеристику асинхронного электродвигателя строят по каталожным или паспортным данным. В паспортных данных двигателя или на его щитке указаны следующие технические данные: номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$), номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$), номинальный ток ($I_{\text{ном}}$), номинальная частота вращения ($n_{\text{ном}}$) или синхронная частота вращения (n_0). По этим данным строят механическую характеристику по точкам (рис. 1.20).

Первая точка 1 — точка синхронной угловой скорости — имеет следующие координаты: момент равен нулю и угловая скорость равна синхронной, т. е. $M = 0$ и $\omega = \omega_0$.

Синхронная угловая скорость

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (1.15)$$

где f — частота сети, 50 Гц; p — число пар полюсов.

Синхронная частота вращения двигателя

$$n_0 = 60f/p = 3000/p.$$

Поэтому синхронная частота вращения принимает строго определенные значения: 3000, 1500, 1000 мин⁻¹ и т. д.

Повторим, что связь между угловой скоростью ω (рад/с) и частотой вращения n (мин⁻¹) выражена следующим образом:

$$\omega = \frac{\pi n_0}{30} \approx 0,105n_0.$$

Вторая точка 2 — точка с номинальными параметрами — имеет координаты: момент равен номинальному, угловая скорость равна номинальной ($M = M_{\text{ном}}$ и $\omega = \omega_{\text{ном}}$).

Номинальную частоту вращения $n_{\text{ном}}$, мин⁻¹, берут из паспорта, а угловую скорость $\omega_{\text{ном}}$, рад/с, определяют: $\omega_{\text{ном}} \approx 0,105n_{\text{ном}}$.

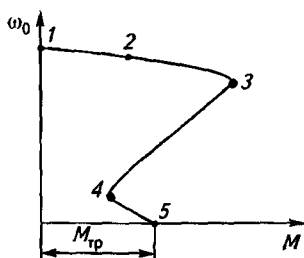


Рис. 1.20. Построение естественной механической характеристики асинхронного двигателя по каталожным данным (по пяти точкам):

ω_0 — синхронная угловая скорость; $M_{\text{тр}}$ — момент трогания двигателя

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}}/\omega_{\text{НОМ}}, \quad (1.16)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ — номинальная мощность электродвигателя, Вт; $\omega_{\text{НОМ}}$ — номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Третья точка 3 соответствует критическому моменту и имеет координаты: момент равен максимальному или критическому, соответственно угловая скорость равна критической ($M = M_{\text{кр}}$ и $\omega = \omega_{\text{кр}}$).

Максимальный (критический) момент

$$M_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{НОМ}}} M_{\text{НОМ}} = M_{*\text{кр}} M_{\text{НОМ}}, \quad (1.17)$$

где $M_{*\text{кр}} = M_{\text{кр}}/M_{\text{НОМ}}$ — кратность критического момента (паспортная величина, безразмерная).

Критическая угловая скорость

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_0(1 - S_{\text{кр}}), \quad (1.18)$$

где $S_{\text{кр}}$ — критическое скольжение:

$$S_{\text{кр}} = \frac{S_{\text{НОМ}}(M_{*\text{кр}} + \sqrt{(M_{*\text{кр}})^2 + 2S_{\text{НОМ}}(M_{*\text{кр}} - 1)})}{1 - 2S_{\text{НОМ}}(M_{*\text{кр}} - 1)}, \quad (1.19)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ — номинальное скольжение, $S_{\text{НОМ}} = (\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}})/\omega_0$, или $S_{\text{НОМ}} = (n_0 - n_{\text{НОМ}})/n_0$.

Четвертая точка 4 — точка минимального момента — имеет координаты: момент равен минимальному, соответственно угловая скорость равна минимальной ($M = M_{\text{мин}}$ и $\omega = \omega_{\text{мин}}$).

Минимальный момент

$$M_{\text{мин}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{НОМ}}} M_{\text{НОМ}} = M_{*\text{мин}} M_{\text{НОМ}}, \quad (1.20)$$

где $M_{*\text{мин}} = M_{\text{мин}}/M_{\text{НОМ}}$ — кратность минимального момента (паспортная величина, безразмерная); $M_{\text{НОМ}}$ — номинальный момент двигателя.

Угловая скорость, соответствующая минимальному моменту,

$$\omega_{\text{мин}} \approx \frac{1}{7} \omega_0. \quad (1.21)$$

Пятая точка 5 — точка пускового момента — имеет координаты: момент равен пусковому, угловая скорость равна нулю ($M = M_{\text{пуск}}$ и $\omega = 0$).

Пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} M_{\text{ном}} = M_{*\text{пуск}} M_{\text{ном}}, \quad (1.22)$$

где $M_{*\text{пуск}} = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ — кратность пускового момента (паспортная величина, безразмерная); $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя.

1.3.7. ИСКУССТВЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВИГАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

Искусственные характеристики асинхронного двигателя получают за счет изменения питающего напряжения; питающей частоты; введения в цепь статора и ротора добавочных сопротивлений.

Искусственные механические характеристики, получаемые при изменении питающего напряжения. Для построения рабочей ветви искусственной механической характеристики рассмотрим две точки. Первая 1 точка соответствует синхронной угловой скорости, вторая 2 — максимальному (критическому) моменту (рис. 1.21).

Как видно из формулы (1.15), синхронная угловая скорость от напряжения не зависит. Следовательно, ее расположение на оси ординат не изменяется. Вторая точка имеет координаты: момент критический и угловая скорость критическая. Критическая угловая скорость от напряжения не зависит, а критический момент пропорционален квадрату фактического напряжения, т. е. $M_{\text{кр}} \sim U_{\text{факт}}^2$. Например, при уменьшении напряжения сети на 10 % фактическое напряжение составит 90 % или $U_{\text{факт}} = 0,9 U_{\text{ном}}$. Поэтому момент критический на искусственной характеристике пропорционален

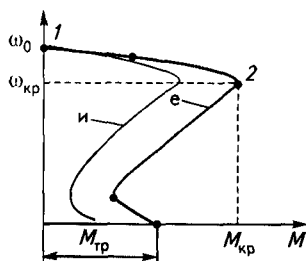
$$M_{\text{кр.иск}} \sim U_{\text{факт}}^2 \sim (0,9 U_{\text{ном}})^2 \sim 0,81 U_{\text{факт}}^2.$$

Для нахождения $M_{\text{кр.иск}}$ составим пропорцию:

$$\begin{aligned} M_{\text{кр.ест}} &\sim U_{\text{ном}}^2; \\ M_{\text{кр.иск}} &\sim 0,81 U_{\text{ном}}^2. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Рис. 1.21. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения сети:

e — естественная характеристика при номинальном напряжении сети ($U_{\text{ном}}$); и — искусственная характеристика при пониженном напряжении сети ($U_{\text{факт}} = 0,9 U_{\text{ном}}$); ω_0 — синхронная угловая скорость; $\omega_{\text{кр}}$ — критическая угловая скорость; $M_{\text{тр}}$, $M_{\text{кр}}$ — момент трогания и критический момент двигателя соответственно



Отсюда

$$M_{\text{кр.иск}} = M_{\text{кр.ест}} \frac{0,81U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ном}}^2} \approx 0,81M_{\text{кр.ест}} \quad (1.24)$$

На графике (см. рис. 1.21) откладываем точку, соответствующую 81 % от $M_{\text{кр.ест}}$, и строим искусственную механическую характеристику.

Искусственные механические характеристики, получаемые при введении в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором добавочного сопротивления ($R_{\text{доб}}$). Для построения искусственной механической характеристики рассмотрим две точки (рис. 1.22).

Синхронную угловую скорость (первая точка 1) определяют по формуле (1.15); она не зависит от добавочного сопротивления. Следовательно, первая точка остается на месте. Вторая точка 2 имеет координаты: момент критический и скорость критическая. Критическая скорость обратно пропорциональна добавочному сопротивлению, а критический момент не зависит от добавочного сопротивления. Механические характеристики для этого режима представлены на рисунке 1.22.

Искусственные механические характеристики, получаемые при изменении частоты питающего напряжения. Для построения искусственной механической характеристики рассмотрим две точки (рис. 1.23).

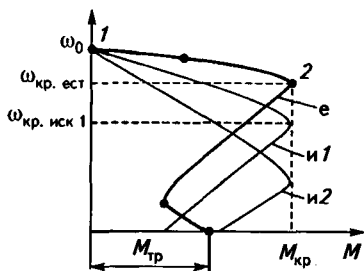


Рис. 1.22. Механические характеристики асинхронного двигателя при введении в цепь ротора добавочного сопротивления:

e — расчетная естественная характеристика при $R_{\text{доб}} = 0$; *и1* — искусственная характеристика при $R_{\text{доб}1} \neq 0$; *и2* — искусственная характеристика при $R_{\text{доб}2} > R_{\text{доб}1}$; $\omega_{\text{кр.ест}}$ — критическая угловая скорость естественной характеристики; $\omega_{\text{кр.иск1}}$ — критическая угловая скорость искусственной характеристики; $M_{\text{тр}}$, $M_{\text{кр}}$ — момент трогания и критический момент двигателя соответственно

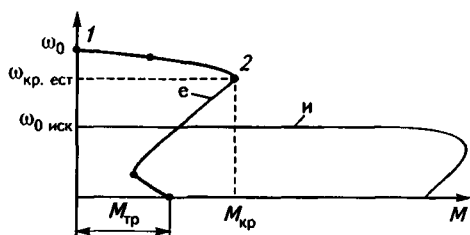


Рис. 1.23. Механические характеристики асинхронного двигателя при уменьшении питающей частоты:

e — естественная характеристика при $f_{\text{ест}} = 50$ Гц; *и* — искусственная характеристика при $f_{\text{иск}} = 0$, $f_{\text{ест}}$; ω_0 — синхронная угловая скорость естественной характеристики; $\omega_0_{\text{иск}}$ — синхронная угловая скорость искусственной характеристики; $\omega_{\text{кр.ест}}$ — критическая угловая скорость естественной характеристики; $M_{\text{тр}}$, $M_{\text{кр}}$ — момент трогания и критический момент двигателя соответственно

Синхронную угловую скорость (первая точка) определяют по формуле (1.15); она прямо пропорционально зависит от частоты питающего напряжения. Следовательно, первая точка будет сдвигаться по оси ординат. Вторая точка имеет координаты: момент критический и скорость критическая. Критическая скорость прямо пропорциональна частоте питающего напряжения, а критический момент прямо пропорционален квадрату частоты питающего напряжения. На рисунке 1.23 приведены естественная и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя при уменьшении частоты питающего напряжения.

1.3.8. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Асинхронные двигатели могут работать в следующих тормозных режимах:

генераторное (рекуперативное) торможение;

динамическое торможение;

торможение противовключением за счет изменения полярности напряжения на зажимах работающего двигателя или за счет введения в цепь ротора большого сопротивления.

Генераторное (рекуперативное) торможение заключается в том, что рабочая машина разгоняет двигатель до скорости выше синхронной (рис. 1.24). При этом скорости двигателя и рабочей машины по направлению совпадают.

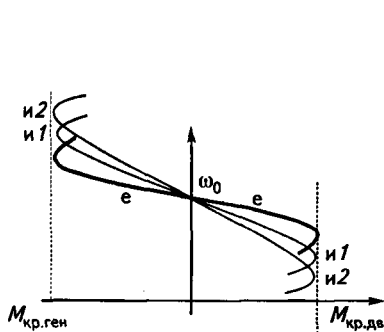


Рис. 1.24. Механические характеристики генераторного (рекуперативного) торможения асинхронного электродвигателя:

e — естественная характеристика; $и1$, $и2$ — первая и вторая искусственные характеристики соответственно; ω_0 — синхронная угловая скорость; $M_{кр.дв}$, $M_{кр.ген}$ — критические моменты при работе двигателя в двигательном и генераторном режимах соответственно

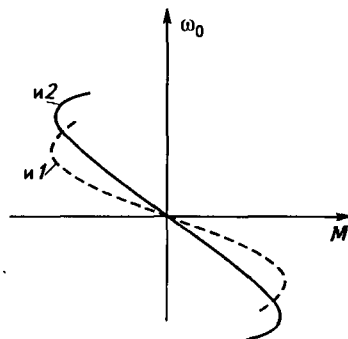


Рис. 1.25. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения:

$и1$, $и2$ — первая и вторая искусственные характеристики соответственно

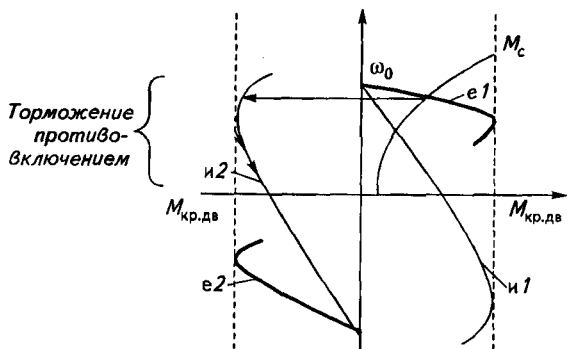


Рис. 1.26. Механические характеристики торможения противвключением:

e_1, e_2 — естественные характеристики при прямом и обратном вращении двигателя соответственно; $и_1, и_2$ — искусственные характеристики при прямом и обратном вращении двигателя соответственно; $M_{кр.дв}$ — критический момент двигателя

В режиме *динамического торможения* электродвигатель отключается от сети переменного тока и подключается к сети постоянного. В этом случае механическая характеристика будет иметь вид (рис. 1.25).

Наиболее распространена схема торможения асинхронного двигателя с самовозбуждением, в которой двигатель отключается от сети переменного тока и подключается на конденсаторную батарею.

В режиме *торможения противвключением* магнитное поле электрического двигателя и рабочая машина вращаются в противоположные стороны. Механические характеристики режима торможения за счет изменения полярности напряжения на зажимах работающего двигателя представлены на рисунке 1.26.

1.3.9. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ. СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Наряду с перечисленными выше двигателями постоянного тока параллельного возбуждения и асинхронными используют двигатели постоянного тока *последовательного, смешанного возбуждения и синхронные.*

Двигатели последовательного возбуждения. В машинах с таким двигателем обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря. Поэтому ток якоря — это одновременно и ток возбуждения, вследствие чего магнитный поток двигателя при работе его не остается постоянным, как это имеет место у двигателя параллельного возбуждения, а изменяется в зависимости от нагрузки. Кривая намагничивания (зависимость магнитного потока Φ от тока возбуждения) не представляет собой аналитическую кривую и механические характеристики этого типа двигателей не могут быть выражены аналитически. Поэтому в каталогах для этого типа

двигателей наряду с обычными техническими данными приведены универсальные характеристики, показывающие в относительных единицах зависимость угловой скорости и момента от тока.

Характеристики *a* двигателя последовательного возбуждения показаны на рисунке 1.27. При холостом ходе (малых нагрузках) угловая скорость достигает весьма больших значений (как говорят, двигатель идет «вразнос»), опасных для механической прочности якоря и коллектора, вследствие чего для двигателей последовательного возбуждения режим холостого хода недопустим.

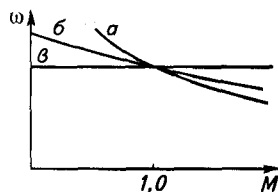
Кроме двигательного режима машина последовательного возбуждения может работать в тормозных режимах противовключения и динамического торможения. Характеристики противовключения расположены в зоне отрицательных угловых скоростей и положительных моментов, как и для двигателя параллельного возбуждения.

Двигатели смешанного возбуждения. Они имеют последовательную и параллельную обмотки. Механическая характеристика *б* такого двигателя приведена на рисунке 1.27. Для этого типа двигателей возможны тормозные режимы: торможение противовключением, при котором угловая скорость отрицательна, а момент и ток якоря положительны; рекуперативное торможение, при котором скорость положительна, а момент и ток якоря отрицательны. Однако возможность работы двигателя в этом режиме очень ограничена. При работе в режиме динамического торможения с независимым возбуждением используют последовательную и параллельную обмотки либо только параллельную обмотку.

Синхронные трехфазные двигатели. Они находят широкое применение, так как обладают высоким коэффициентом мощности, способностью отдавать в сеть реактивную мощность и т. д. КПД современных синхронных двигателей составляет 96...98 %, что на 1...1,5 % выше КПД асинхронных с теми же габаритными размерами и скоростью. В синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности посредством регулирования тока возбуждения, причем она меньше зависит от напряжения сети, чем в асинхронных. Синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой *в* (см. рис. 1.27). Важное преимущество конструкции синхронных двигателей — наличие большого воздушного зазора, вследствие чего его характеристики и свойства мало зависят от износа подшипников и неточности монтажа ротора.

Рис. 1.27. Сравнение механических характеристик двигателей различного возбуждения:

a — последовательного возбуждения; *б* — смешанного; *в* — параллельного



Контрольные вопросы и задания

1. Что такое электропривод? 2. Что понимают под механической характеристикой? 3. Поясните изменение механической характеристики рабочей машины при различных значениях показателя степени «X». 4. Что понимают под естественной и искусственной характеристиками электрических машин? 5. Выведите уравнение механической (электромеханической) характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. 6. Как можно построить механическую характеристику двигателя постоянного тока по каталожным данным? 7. Расскажите о тормозных режимах двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. 8. Объясните построение механической характеристики асинхронного электродвигателя по каталожным данным. 9. Что понимают под выражением IP 44? 10. Расскажите о режиме рекуперативного торможения. 11. Что понимают под режимом торможения асинхронного двигателя противовключением? 12. Что понимают под режимом динамического торможения асинхронного двигателя? 13. На сколько процентов снижается момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 20 % номинального? 14. От чего зависит критическое скольжение? 15. От чего зависит критический момент?

1.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Под регулированием скорости электропривода понимают ее принудительное изменение в соответствии с требованиями технологического процесса.

1.4.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Для сравнения различных способов регулирования угловой скорости используют шесть следующих критериев: диапазон регулирования; плавность регулирования; направление регулирования; стабильность регулирования; экономичность регулирования; регулирование угловой скорости при постоянном допустимом моменте ($M_{\text{доп}} = \text{const}$) и/или при постоянной допустимой мощности ($P_{\text{доп}} = \text{const}$).

Рассмотрим эти критерии подробнее.

Диапазон регулирования угловой скорости равен отношению максимальной угловой скорости к минимальной (рис. 1. 28):

$$D = \omega_{\text{макс}}/\omega_{\text{мин}}$$

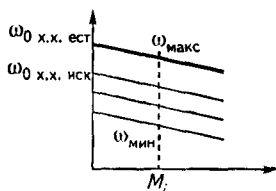


Рис. 1.28. Определение диапазона регулирования угловой скорости при изменении питающего напряжения:

$\omega_{\text{х.х. ест}}$, $\omega_{\text{х.х. иск}}$ — скорость идеального холостого хода двигателя естественной и искусственной характеристик соответственно; M_i — текущий момент

Плавность регулирования угловой скорости оценивают коэффициентом плавности ($K_{пл}$), который равен отношению скоростей на двух рядом лежащих механических характеристиках (рис. 1.29):

$$K_{пл} = \omega_{i-1} / \omega_i \quad (1.25)$$

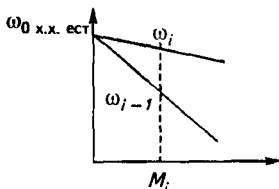


Рис. 1.29. Определение коэффициента плавности при регулировании угловой скорости введением в цепь якоря дополнительного сопротивления

Коэффициент плавности всегда меньше единицы. Если регулирование скорости плавное, то он стремится к единице.

Направление регулирования угловой скорости показывает, как изменяется скорость по отношению к синхронной скорости или скорости идеального холостого хода: *вверх* или *вниз*.

Стабильность регулирования угловой скорости представляет собой важную характеристику. Ее оценивают коэффициентом жесткости (α), равным отношению приращения момента к соответствующему приращению угловой скорости:

$$\alpha = dM/d\omega \approx \Delta M / \Delta \omega \quad (1.26)$$

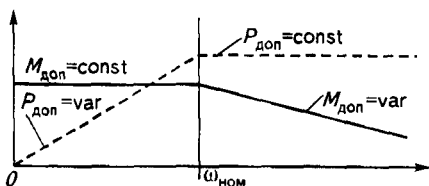
Различают абсолютно жесткую характеристику (у синхронных двигателей), жесткую (у двигателей постоянного тока параллельного или независимого возбуждения), мягкую (у двигателей постоянного тока последовательного возбуждения). У асинхронных двигателей рабочая ветвь механической характеристики жесткая.

Экономичность регулирования угловой скорости оценивают капитальными затратами, эксплуатационными издержками, а также электрическими потерями мощности.

Регулирование угловой скорости при постоянном допустимом моменте ($M_{доп} = \text{const}$) и/или при постоянной допустимой мощности ($P_{доп} = \text{const}$) иллюстрирует рисунок 1.30. На изменение момента не оказывает влияние ни напряжение, ни добавочное сопротивление, но оказывает влияние магнитный поток, так как $M \cong k\Phi I$.

Рис. 1.30. Определение регулирования угловой скорости при $M_{доп} = \text{const}$ или при $P_{доп} = \text{const}$:

при $M_{доп} = \text{const}$ — регулирование скорости в сторону ее понижения изменением напряжения или введением добавочного сопротивления; при $P_{доп} = \text{const}$ — регулирование скорости в сторону ее повышения изменением магнитного потока



1.4.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (ДПТ ПВ) имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k\Phi_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{НОМ}})^2} M. \quad (1.27)$$

Из выражения (1.27) следует, что на угловую скорость оказывает влияние питающее напряжение, магнитный поток и добавочное сопротивление, включаемое в цепь якоря.

Проанализируем по шести перечисленным критериям регулирование скорости ДПТ ПВ изменением напряжения питающей сети. Механические характеристики для этого случая изображены на рисунке 1.28.

Диапазон регулирования составляет $D = (8 \dots 10) : 1$. При использовании автотрансформаторов регулирование угловой скорости плавное, при понижении напряжения направление регулирования угловой скорости вниз; регулирование стабильное, т. е. коэффициент жесткости не меняется; регулирование неэкономичное ввиду больших капитальных затрат; регулирование угловой скорости осуществляют при постоянном допустимом моменте $M_{\text{доп}} = \text{const}$.

Проанализируем перечисленные критерии в случае регулирования угловой скорости ДПТ ПВ *введением в цепь якоря добавочного сопротивления* (см. рис. 1.29).

Диапазон регулирования угловой скорости $D = 2,5 : 1$; регулирование ступенчатое; направление регулирования угловой скорости вниз; жесткость механических характеристик уменьшается, т. е. коэффициент жесткости падает; регулирование неэкономичное ввиду больших потерь мощности в добавочном сопротивлении $[I_{\text{я}}^2(R_{\text{я}} + R_{\text{доб}})]$; регулирование угловой скорости осуществляют при постоянном допустимом моменте $M_{\text{доп}} = \text{const}$.

В случае регулирования угловой скорости ДПТ ПВ *уменьшением магнитного потока* (рис. 1.31) критерии изменяются следующим образом.

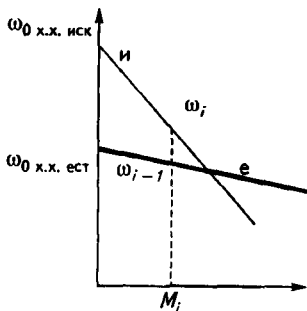


Рис. 1.31. Изменение скорости ДПТ ПВ при уменьшении магнитного потока:

e — естественная характеристика при номинальном потоке ($\Phi_{\text{НОМ}}$); i — искусственная характеристика при уменьшении магнитного потока ($\Phi_{\text{ИСК}} < \Phi_{\text{НОМ}}$); $\omega_{0\text{х.х.ест.}}$, $\omega_{0\text{х.х.иск}}$ — скорости идеального холостого хода естественной и искусственной характеристик соответственно; ω_i и ω_{i-1} — текущие угловые скорости двигателя искусственной и естественной характеристик соответственно при текущем моменте M_i .

Диапазон регулирования $D = 3 : 1$; регулирование плавное; направление регулирования угловой скорости вверх; жесткость механических характеристик уменьшается, т. е. коэффициент жесткости падает; регулирование экономичное ввиду небольших потерь мощности в шунтовом реостате ($I_{0,в}^2 R_{0,в}$); регулирование угловой скорости осуществляют при постоянной допустимой мощности ($P_{доп} = \text{const}$).

1.4.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для того чтобы понять, за счет каких параметров можно регулировать угловую скорость асинхронного двигателя, проанализируем формулу для нахождения угловой скорости асинхронного электродвигателя:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}(1 - S), \quad (1.28)$$

где p — число пар полюсов; f — частота сети; S — скольжение.

Преобразовав формулу (1.18) для критического скольжения ($S_{кр}$), получим

$$S_{кр} = \frac{\omega_0 - \omega_{кр}}{\omega_0}. \quad (1.29)$$

С другой стороны, критическое скольжение

$$S_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{к.з.}^2}}, \quad (1.30)$$

где R'_2 , R_1 — приведенное сопротивление обмотки ротора и сопротивление обмотки статора соответственно; $X_{к.з.}$ — сопротивление короткого замыкания.

Из формул (1.28), (1.29) и (1.30) следует, что на угловую скорость вала асинхронного электродвигателя оказывают влияние пять факторов: частота питающего напряжения, число пар полюсов, добавочные сопротивления (активные и реактивные), включаемые в обмотку статора или ротора, и питающее напряжение. Влияние питающего напряжения и добавочных активных сопротивлений, включаемых в обмотку ротора, на угловую скорость асинхронного электродвигателя показано на рисунках 1.21 и 1.22.

При регулировании угловой скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения одновременно с час-

тотой меняется и напряжение. Угловую скорость асинхронных двигателей изменяют с помощью транзисторных и тиристорных преобразователей частоты. Ввиду того что условно все рабочие машины разбиты на четыре группы, существуют и условные четыре закона регулирования угловой скорости асинхронного двигателя. В основу каждого закона положено постоянство перегрузочной способности электродвигателя:

$$M_{кр}/M_{ном} = \text{const}, \quad (1.31)$$

где $M_{кр}$, $M_{ном}$ — соответственно критический и номинальный моменты электродвигателя.

Выведем закон регулирования угловой скорости при работе электропривода с рабочей машиной, у которой показатель степени X равен нулю (см. рис. 1.4).

Для рабочих точек 1 и 2 (рис. 1.32) перегрузочная способность выглядит так:

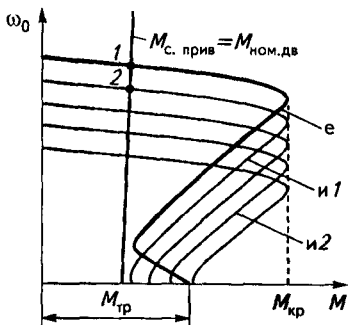
$$\frac{M_{кр1}}{M_{ном.дв}} = \frac{M_{кр2}}{M_{ном.дв}} = \text{const}. \quad (1.32)$$

Обычно при рациональном использовании электродвигателя $M_{ном.дв} = M_{с.прив}$. Поэтому выражение (1.32) примет вид:

$$\frac{M_{кр1}}{M_{с.прив 1}} = \frac{M_{кр2}}{M_{с.прив 2}} = \text{const}. \quad (1.33)$$

Так как критический момент $M_{кр}$ прямо пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален квадрату частоты, выражение (1.33) можно записать:

$$\frac{U_1^2}{M_{с.прив 1} f_1^2} = \frac{U_2^2}{M_{с.прив 1} f_2^2} = \text{const}. \quad (1.34)$$



Из формулы (1.1) следует, что мо-

Рис. 1.32. Механические характеристики электродвигателя, работающего с рабочей машиной, у которой $X=0$:

e — естественная при номинальной частоте сети ($f_{ном}$); и 1 — искусственная при пониженной частоте сети ($f_{иск1} < f_{ном}$); и 2 — искусственная при пониженной частоте сети ($f_{иск2} < f_{иск1}$); $M_{с.прив}$ — приведенный момент сопротивления рабочей машины; $M_{ном.дв}$, $M_{тр}$ — номинальный момент и момент трогания двигателя соответственно

мент сопротивления рабочей машины прямо пропорционален частоте (f) в степени X :

$$M_{с.прив} \sim \omega^X \sim f^X. \quad (1.35)$$

С учетом этого формула (1.34) примет вид:

$$\frac{U_1^2}{f_1^1 f_1^2} = \frac{U_2^2}{f_2^1 f_2^2} = \text{const.} \quad (1.36)$$

Поэтому закон регулирования угловой скорости асинхронного двигателя при $X = 0$:

$$U/f = \text{const.} \quad (1.37)$$

Для рабочих машин, у которых $X = 2$ (рис. 1.33), закон регулирования угловой скорости выглядит следующим образом:

$$U/f^2 = \text{const.} \quad (1.38)$$

Для рабочих машин с показателем $X = 1$ закон регулирования угловой скорости имеет вид:

$$\frac{U}{f\sqrt{f}} = \text{const.}, \quad (1.39)$$

и для $X = -1$ (рис. 1.34) закон регулирования:

$$U/\sqrt{f} = \text{const.} \quad (1.40)$$

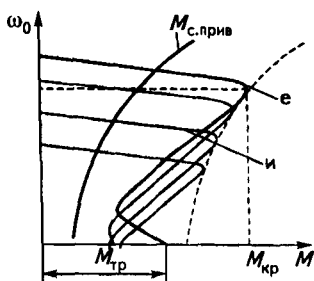


Рис. 1.33. Изменение механических характеристик при $X = 2$:

e — естественная; $и$ — искусственная; $M_{тр}$ — момент трогания двигателя; $M_{с.прив}$ — приведенный момент сопротивления рабочей машины

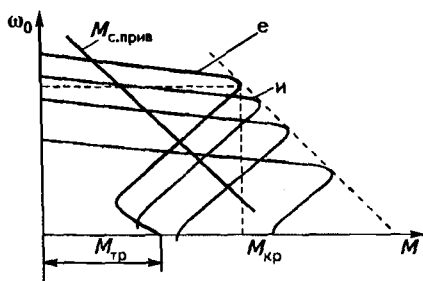


Рис. 1.34. Изменение механических характеристик при $X = -1$:

e — естественная; $и$ — искусственная

1.4.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Асинхронные электродвигатели (АД), у которых скорость регулируют изменением числа пар полюсов, называют *многоскоростными*. Наибольшее распространение получили однообмоточные многоскоростные асинхронные электродвигатели, у которых делают переключение секций обмоток для получения различного числа пар полюсов.

Среди схем соединения обмоток статора АД наиболее распространены «звезда — двойная звезда» (Y/Y₂) и «треугольник — двойная звезда» (Δ/Y₂).

На рисунках 1.35...1.38 показаны возможные схемы соединения обмоток статора АД.

При последовательно-согласованном включении обмоток (см. рис. 1.35) образуются четыре полюса, следовательно, число пар полюсов равно 2; синхронная угловая скорость составляет 157 рад/с, синхронная частота вращения 1500 мин⁻¹.

При согласно-параллельном включении (см. рис. 1.36) число полюсов равно 4; число пар полюсов 2; синхронная угловая скорость 157 рад/с, синхронная частота вращения 1500 мин⁻¹.

При встречно-согласованном включении обмоток (см. рис. 1.37)

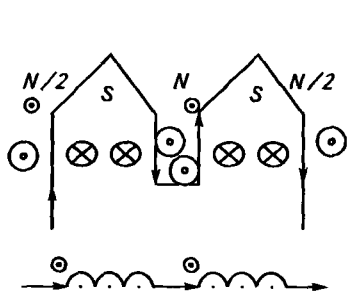


Рис. 1.35. Последовательно-согласованное включение обмоток

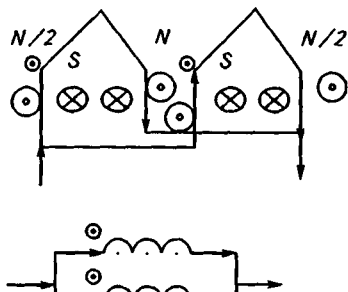


Рис. 1.36. Согласно-параллельное включение обмоток

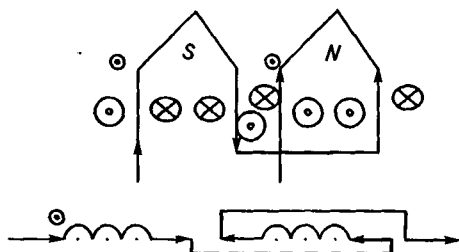


Рис. 1.37. Встречно-согласованное включение обмоток

число полюсов равно 2; число пар полюсов 1; синхронная угловая скорость 314 рад/с, синхронная частота вращения 3000 мин⁻¹.

При встречно-согласованном включении обмоток (см. рис. 1.38) число полюсов равно 2; число пар полюсов 1; синхронная угловая скорость 314 рад/с, синхронная частота вращения 3000 мин⁻¹.

Рассмотрим соединение обмоток асинхронного электродвигателя по схеме Δ/ΥΥ (рис. 1.39).

Мощность асинхронного двигателя при соединении обмоток Δ

$$P_{\text{доп}\Delta} = 3\sqrt{3}U_{\phi}I_{\text{ном}}\cos\varphi_{\Delta}, \quad (1.41)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение.

Мощность асинхронного двигателя при соединении обмоток ΥΥ

$$P_{\text{доп}\Upsilon\Upsilon} = 3U_{\phi} \cdot 2I_{\text{ном}}\cos\varphi_{\Upsilon\Upsilon}. \quad (1.42)$$

С учетом того, что $\cos\varphi_{\Upsilon\Delta} \approx \cos\varphi_{\Upsilon\Upsilon}$, получаем

$$\frac{P_{\text{доп}\Delta}}{P_{\text{доп}\Upsilon\Upsilon}} = \frac{\sqrt{3}\cos\varphi_{\Delta}}{2\cos\varphi_{\Upsilon\Upsilon}} \approx 1. \quad (1.43)$$

Таким образом, регулирование угловой скорости происходит при постоянной допустимой мощности

$$P_{\text{доп}} = \text{const.}$$

Рис. 1.39. Соединение обмоток асинхронного двигателя по схеме Δ/ΥΥ:

1C₁; 1C₄ — начало и конец обмотки первой секции; 2C₁; 2C₄ — начало и конец обмотки второй секции

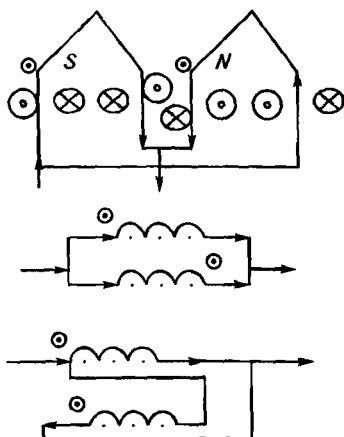
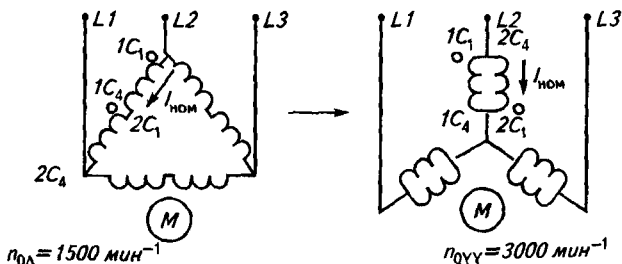


Рис. 1.38. Встречно-параллельное включение обмоток

Рассмотрим *изменение перегрузочной способности* двигателя при соединении обмоток статора треугольником. В этом случае критический момент равен:

$$M_{кр\Delta} = \frac{3(\sqrt{3}U_{\Phi})^2}{2\omega_{0\Delta} \left(2R_1 + \sqrt{(2R_1)^2 + (2X_k)^2} \right)} = \frac{3 \cdot 3U_{\Phi}^2}{4\omega_{0\Delta} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}, \quad (1.44)$$

где R_1, X_k — сопротивление одной секции обмотки статора; $2R_1, 2X_k$ — сопротивление обмотки статора.

При соединении обмоток статора двойной звездой критический момент

$$\begin{aligned} M_{крYY} &= \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_{0YY} \left(\frac{R_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{R_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{X_k}{2}\right)^2} \right)} \\ &= \frac{3U_{\Phi}^2}{2 \cdot 2\omega_{0Y} \frac{1}{2} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_{0Y} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Поэтому

$$\frac{M_{кр\Delta}}{M_{крYY}} = \frac{3\omega_{0YY}}{2\omega_{0\Delta}} = \frac{3}{2} = 1,5. \quad (1.46)$$

На рисунке 1.40 показаны механические характеристики асинхронного электродвигателя при соединении обмоток по схеме Δ/YY .

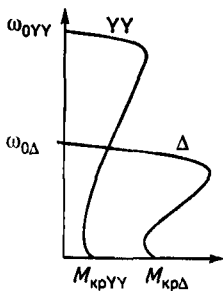


Рис. 1.40. Механические характеристики асинхронного электродвигателя при соединении обмоток по схеме Δ/YY

Способ регулирования скорости целесообразно использовать для привода рабочих машин с меняющимся моментом сопротивления. Это вентиляторные установки, центробежные насосы и т. д.

Рассмотрим соединение обмоток асинхронного электродвигателя по схеме Y/YY (рис. 1.41).

$$\begin{aligned} M_{крY} &= \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_{0Y} \left(2R_1 + \sqrt{(2R_1)^2 + (2X_1)^2} \right)} \\ &= \frac{3U_{\Phi}^2}{4\omega_{0Y} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \end{aligned} \quad (1.47)$$

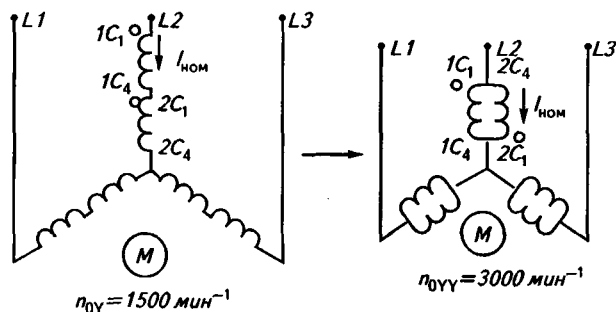


Рис. 1.41. Соединение обмоток асинхронного двигателя по схеме Y/Y

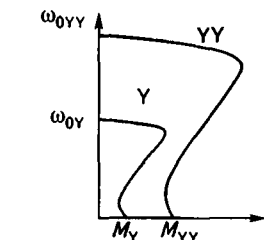


Рис. 1.42. Механические характеристики асинхронного электродвигателя при соединении обмоток по схеме Y/YY

При соединении обмоток статора двойной звездой критический момент определяют по формуле (1.45). Следовательно, перегрузочная способность в этом случае составляет

$$\frac{M_{кpY}}{M_{кpYY}} = \frac{1 \cdot 2}{4 \cdot 1} = \frac{1}{2}, \quad (1.48)$$

т. е. при переключении обмоток статора со звезды на двойную звезду перегрузочная способность двигателя увеличивается в 2 раза.

Рабочие машины, для которых используют этот способ регулирования, — транспортер, подъемные краны, тельферы и т. д. У них показатель степени равен нулю ($X = 0$).

На рисунке 1.42 показаны механические характеристики асинхронного электродвигателя при соединении обмоток статора по схеме Y/YY.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под регулированием угловой скорости электропривода?
2. Какими способами регулируют угловую скорость двигателя постоянного тока?
3. Расскажите о регулировании угловой скорости с постоянной допустимой мощностью и постоянным допустимым моментом.
4. Какие критерии регулирования угловой скорости используют при анализе способов регулирования?
5. Какие технические устройства позволяют реализовать способы регулирования угловой скорости?
6. Какими способами регулируют угловую скорость в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором?
7. Какими способами целесообразно регулировать угловую скорость в асинхронном двигателе с фазным ротором?
8. Какими способами целесообразно регулировать угловую скорость в асинхронных двигателях?
9. Какие способы регулирования скорости наиболее экономичны? Ответ обоснуйте.
10. Что понимают под стабильностью регулирования, экономичностью регулирования, направлением регулирования, диапазоном регулирования, плавностью регулирования?

1.5. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

По технологическим требованиям скорости асинхронного электродвигателя, а следовательно, рабочей машины могут меняться. При этом в соответствии с законом изменения энергии можно записать баланс энергии:

$$A_{\text{дв}} - A_{\text{с}} = A_{\text{дин}} = J_{\text{прив}} \frac{\omega^2}{2}, \quad (1.49)$$

где $A_{\text{дв}}$ — энергия, отдаваемая асинхронным электродвигателем; $A_{\text{с}}$ — энергия, потребляемая рабочей машиной; $A_{\text{дин}}$ — динамическая энергия; $J_{\text{прив}}$ — приведенный момент инерции системы электродвигатель — рабочая машина; ω — угловая скорость электродвигателя.

Продифференцируем выражение (1.49) по времени

$$\frac{dA_{\text{дв}}}{dt} - \frac{dA_{\text{с}}}{dt} = \frac{d(J \frac{\omega^2}{2})}{dt}. \quad (1.50)$$

Примем, что момент инерции J — постоянная величина. Тогда

$$P_{\text{дв}} - P_{\text{с}} = J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.51)$$

Разделив выражение (1.51) на угловую скорость ω , получим основное уравнение движения электропривода для постоянного момента инерции J :

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.52)$$

где $M_{\text{дв}}$ — момент, развиваемый двигателем; $M_{\text{с}}$ — момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя.

При $d\omega/dt > 0$ система ускоряется, при $d\omega/dt < 0$ — тормозится, при $d\omega/dt = 0$ совершает равномерное, установившееся движение.

Если система совершает поступательное движение, то основное уравнение движения электропривода примет вид:

$$F_{\text{дв}} - F_{\text{с}} = F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}, \quad (1.53)$$

где $F_{\text{дв}}$ — усилие, развиваемое электродвигателем; $F_{\text{с}}$ — приведенное усилие статических сопротивлений; $F_{\text{дин}}$ — динамическое усилие; m — масса рабочей машины; v — линейная скорость рабочей машины.

1.5.1. МОМЕНТЫ И СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

При расчетах необходимо пересчитывать моменты и массы различных элементов системы к какому-либо одному из элементов, чаще к валу двигателя.

Приведение моментов проводят исходя из закона равенства мощностей:

$$M_{с.прив} n_{дв} = \frac{M_{с.р.м} n_{р.м.}}{\eta_{пер}}, \quad (1.54)$$

или

$$M_{с.прив} \omega_{дв} = \frac{M_{с.р.м} \omega_{р.м.}}{\eta_{пер}}. \quad (1.55)$$

Откуда

$$M_{с.прив} = M_{с.р.м} \frac{\omega_{р.м.}}{\eta_{пер} \cdot \omega_{дв}} = \frac{M_{тр} + (M_{с.ном} - M_{тр}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном.дв}} \right)^x}{i \eta_{пер}}, \quad (1.56)$$

где $M_{с.прив}$ — приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления рабочей машины; $M_{с.р.м}$ — фактический момент сопротивления рабочей машины; $\omega_{ном.дв}$ — угловая скорость электродвигателя; $\omega_{р.м}$ — угловая скорость рабочей машины; $\eta_{пер}$ — КПД передачи; i — передаточное отношение, $i = \omega_{дв}/\omega_{р.м}$.

Если в системе имеются рабочие органы, совершающие возвратно-поступательное движение с усилием F_c и скоростью $v_{р.м}$, то это усилие может быть приведено к валу электродвигателя и замещено соответствующим моментом из выражения:

$$M_{с.прив} = \frac{F_c v_{р.м.}}{\eta_{пер} \omega_{дв}}. \quad (1.57)$$

Определение *приведенного момента инерции* основано на равенстве кинетических энергий, запасенных в фиктивном (виртуальном) маховике, установленном на валу электродвигателя и обладающем $J_{прив}$, и энергий, запасенных во всех движущихся частях системы (рис. 1.43).

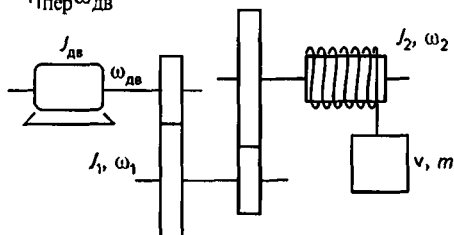


Рис. 1.43. Кинематическая схема электропривода

Для схемы электропривода, показанного на рисунке 1.43, имеем

$$J_{\text{прив}} \frac{\omega_{\text{дв}}^2}{2} = J_{\text{дв}} \frac{\omega_{\text{дв}}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + m \frac{v_1^2}{2}; \quad (1.58)$$

$$J_{\text{прив}} = J_{\text{дв}} + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_{\text{дв}}^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_{\text{дв}}^2} + m \frac{v_1^2}{\omega_{\text{дв}}^2} = J_{\text{дв}} + \frac{J_1}{i^2_1} + \frac{J_2}{i^2_2} + m \frac{v_1^2}{\omega_{\text{дв}}^2}. \quad (1.59)$$

Для практических расчетов можно воспользоваться формулой

$$J_{\text{прив}} = 1,2J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{р.м}}}{i^2}, \quad (1.60)$$

где i — передаточное отношение, $i = \omega_{\text{дв}}/\nu_{\text{р.м}}$.

1.5.2. ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Под *переходными процессами* понимают процессы, протекающие в электроприводе при переходе из одного установившегося состояния в другое, когда происходит изменение какой-либо величины во времени, например угловой скорости, момента, тока, мощности и т. д. Зависимости угловой скорости, момента, тока, мощности и т. д. от времени носят название *нагрузочных диаграмм*.

Переходные процессы возникают при пуске, торможении, реверсе, приеме или сбросе нагрузки. На длительность переходного процесса оказывают влияние *механическая инерция* вращающихся или поступательно движущихся частей рабочей машины, описываемая электромеханической постоянной (T_M), *электромеханическая инерция*, обусловленная индуктивностью катушек электрических машин и аппаратов, *тепловая инерция* электрических машин и некоторых элементов аппаратуры, оцениваемая постоянной времени нагрева (T_H).

Электромеханическая постоянная (T_M) представляет собой время разгона электропривода на холостом ходу до скорости, равной синхронной при постоянном моменте двигателя, равном номинальному.

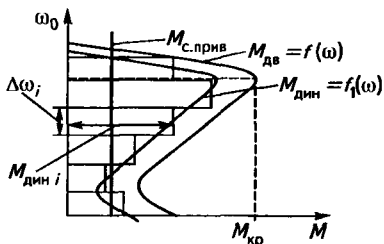
1.5.3. ВРЕМЯ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Под временем пуска понимают продолжительность разбега агрегата. Время пуска и торможения можно определить, решив основное уравнение движения электропривода (1.52) относительно времени, т. е., разделив переменные, получим:

$$dt = J_{\text{прив}} \frac{d\omega}{M_{\text{дв}} - M_c}. \quad (1.61)$$

Рис. 1.44. Определение времени пуска электропривода графоаналитическим способом:

$M_{\text{дин}}$ — динамический момент, $M_{\text{с.прив}}$ — приведенный момент сопротивления рабочей машины



Откуда

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{прив}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{\text{дв}} - M_{\text{с.прив}}} \quad (1.62)$$

Если $\omega_1 = 0$ и $\omega_2 = \omega_{\text{ном.дв}}$, рассчитывают время пуска. Если $\omega_1 = \omega_{\text{ном.дв}}$ и $\omega_2 = 0$, рассчитывают время торможения.

Уравнение (1.62) бывает сложно решить аналитически. Поэтому для определения времени пуска используют графоаналитический и графический методы.

Рассмотрим подробно только наиболее простой *графоаналитический метод* определения времени пуска электропривода (рис. 1.44).

Для этого по пяти точкам строят механическую характеристику асинхронного электродвигателя $M_{\text{дв}} = f(\omega)$ (см. рис. 1.44). Далее по формуле (1.56) строят приведенную механическую характеристику рабочей машины ($M_{\text{с.прив}}$). Графическим способом находят разность ($M_{\text{дв}} - M_{\text{с.прив}}$) и получают динамический момент $M_{\text{дин}} = f_1(\omega)$. Из рисунка 1.44 следует, что динамический момент имеет сложную зависимость и аналитически его трудно описать. Поэтому этот момент заменяют несколькими прямоугольниками (ступенями). При этом стараются выдерживать равенство между площадками, оказавшимися над и под короткой стороной прямоугольника. Для каждого прямоугольника проекция его стороны на ось моментов равна моменту динамическому, а проекция другой стороны на ось угловой скорости — изменению ее для этой ступени. В этом случае общее время разгона электропривода

$$t_{\text{разг}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (1.63)$$

где Δt_i — время разгона электропривода на i -й ступени, $\Delta t_i = J_{\text{прив}} \Delta \omega_i / M_{\text{дин } i}$; n — общее число ступеней.

Контрольные вопросы и задания

1. С какой целью рассчитывают время разгона электропривода?
2. Расскажите о приведении моментов рабочей машины к валу электрического двигателя.
3. На основе равенства какой энергии осуществляют приведение моментов инерции?
4. Какими способами определяют время разгона электропривода?
5. Поясните графоаналитический метод расчета времени разгона электропривода.

1.6. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Мощность электропривода зависит от мощности используемого электродвигателя. При выборе электродвигателя учитывают допустимую температуру нагрева, возможность надежного запуска при снижении напряжения, устойчивость работы при неблагоприятных внешних условиях.

Особое внимание при выборе мощности электродвигателя уделяют возможным мгновенным перегрузкам, а также нагреву обмоток. Обмотку электродвигателя обычно выполняют из медных изолированных проводников. Эта изоляция — наименее термоустойчивая часть. При чрезмерном перегреве обмоток электродвигателя происходит ускоренное старение изоляции и выход ее из строя. Предельно допустимая температура нагрева изоляции определяется ее классом (табл. 1.6).

1.6. Теплостойкость электроизоляционных материалов

Класс изоляции	Предельно допустимая температура, °С	Нормированное превышение температуры, °С	Краткая характеристика изоляционного материала	Условия работы электродвигателей
А	105	50	Пропитанные волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка	На малых и средних мощностях, применяемых в сельском хозяйстве
Е	120	65	Синтетические органические пленки	—
В	130	70	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими материалами	Частые перегрузки при повышенной температуре окружающей среды
F	155	85	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими материалами	Частые перегрузки при повышенной температуре окружающей среды
Н	180	105	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими материалами	—

Для выбора мощности двигателя необходимо проводить тепловые расчеты электропривода, которые должны показать, что при его работе температура не превышает допустимую. Для этого строят *нагрузочные диаграммы*, иллюстрирующие изменения тока, момента, скорости электродвигателя во времени.

Нагрузочные диаграммы электропривода получают расчетным или экспериментальным путем. Продолжительность той или иной нагрузки электропривода зависит от технологического процесса. Результаты расчета электропривода проверяют по допустимой температуре, по пусковой и перегрузочной способностям.

Для расчета тепловых режимов и выбора мощности электродвигателя не требуется высокой точности. Поэтому часто нагрузочные диаграммы строят упрощенным методом, принимая постоянным ток и момент при пуске и торможении. При этом характер нагрузочной диаграммы за один цикл работы, к примеру, может иметь вид, показанный на рисунке 1.45.

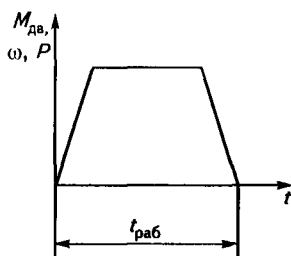


Рис. 1.45. Нагрузочная диаграмма электропривода

1.6.1. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Решающую роль при определении мощности электродвигателя играет нагрев его обмоток. Теплота при работе электродвигателя выделяется обмотками и стальным сердечником. Теплообмен между обмоткой и сердечником происходит через слой изоляции. Теплота рассеивается в окружающую среду в результате продувания охлаждающей среды через воздушный зазор между статором и ротором по специальным воздушным каналам.

Полное использование электродвигателя происходит при предельно допустимой температуре изоляции обмоток (Θ), которую определяют как сумму предельно допустимого превышения температуры для конкретного класса изоляции ($\tau_{\text{доп}}$) и температуры окружающей среды ($t_{\text{ср}}$):

$$\Theta = \tau_{\text{доп}} + t_{\text{ср}}. \quad (1.64)$$

Если температура изоляции обмоток электродвигателя равна температуре окружающей среды или превышает ее на 3°C , то считают, что электродвигатель находится в холодном состоянии.

Тепловой процесс в электродвигателе описывают сложной системой дифференциальных уравнений. В целях упрощения тепловых процессов в электродвигателе нагрев статора и ротора целесообразно рассматривать отдельно. В этом случае задачу сводят к анализу нагрева двух разных тел.

Отдача теплоты в электродвигателях осуществляется *инфракрасным излучением, конвекционными потоками и теплопроводностью материалов*. Наибольшее количество теплоты отдают в окружающую среду конвекционные потоки. Поэтому другими двумя

способами теплообмена обычно пренебрегают и полагают, что отдаваемая в окружающую среду теплота пропорциональна разности температуры двигателя и среды.

Температура окружающей среды, в которой может работать электродвигатель, составляет $-50...50^{\circ}\text{C}$. Следовательно, мощность, которую может обеспечить рассчитываемый электродвигатель, без перегрузок сверх допустимых пределов, ограничена используемой в нем изоляцией и будет различной (см. табл. 1.6). Поэтому принимают расчетную температуру окружающей среды 40°C .

При работе электродвигателя с постоянной нагрузкой в каждую секунду возникают тепловые потери:

$$\Theta = \Sigma \Delta P, \quad (1.65)$$

где Θ — количество теплоты, потерянное в единицу времени, кДж/с; ΔP — потери мощности, кВт.

Отдача теплоты в окружающую среду характеризуется теплоотдачей

$$A = \Sigma \mu F, \quad (1.66)$$

где A — теплоотдача — количество теплоты, рассеиваемое теплоотдающей поверхностью электродвигателя в 1 с при разности температур электродвигателя и окружающей среды 1°C , кДж/(с·град); μ — удельная теплоотдача поверхности, кДж/(с·м²·град); F — площадь теплоотдающей поверхности, м².

Общая теплоемкость (C) электродвигателя, т. е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры электродвигателя на 1°C , кДж/град,

$$C = \Sigma c_0 G, \quad (1.67)$$

где c_0 — удельная теплоемкость отдельных частей электродвигателя, кДж/(кг·град); G — масса отдельных частей, кг.

Дифференциальное уравнение теплового баланса

$$Q dt = C d\tau + A \tau dt, \quad (1.68)$$

где Q — количество теплоты, сообщенное в единицу времени, кДж/с; τ — превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды, град.

Для того чтобы выявить характер изменения температуры электродвигателя, преобразуем уравнение (1.68)

$$dt = \frac{C d\tau}{Q - A \tau}. \quad (1.69)$$

Обозначим $x = Q - At$, тогда $dx = -A dt$. Откуда $dt = -dx/A$. Подставим это выражение в формулу (1.69) и получим

$$dt = -\frac{C}{A} \frac{dx}{x} = -T_n \frac{dx}{x}, \quad (1.70)$$

где T_n — постоянная времени нагрева, $T_n = C/A$.

Проинтегрируем выражение (1.70) и определим время нагрева

$$t = -T_n \ln x + k = -T_n \ln(Q - At) + k, \quad (1.71)$$

где k — постоянная интегрирования.

Окончательное решение дифференциального уравнения показывает, что изменение превышения температуры электродвигателя примет вид:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}) + \tau_{нач}e^{-t/T_n}, \quad (1.72)$$

где $\tau_{уст}$ — установившаяся температура электродвигателя, $\tau_{уст} = Q/A$.

Если начальная температура равна нулю, то

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T_n}). \quad (1.73)$$

Если нагретый электродвигатель отключить от сети, то он начнет охлаждаться. При этом уравнение охлаждения имеет вид:

$$\tau = \tau_{нач.охл} e^{-t/T_{охл}} \quad (1.74)$$

где $T_{охл}$ — постоянная времени охлаждения двигателя, $T_{охл} = C/A_{охл}$.

Практически без большой погрешности можно принять, что в длительном режиме работы температура нагрева электродвигателя устанавливается, т. е. практически не отличается от средней за время $(3...5)T_n$, а при охлаждении — за время $(3...5)T_{охл}$. При этом $T_{охл} = T_n/\beta$. Коэффициент β учитывает условия охлаждения (табл. 1.7).

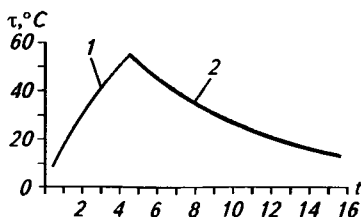


Рис. 1.46. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

1.7. Коэффициент β

Вид двигателя	β	Вид двигателя	β
С независимой вентиляцией	1	Самовентилируемый	0,45...0,55
Без принудительного охлаждения (без крыльчатки)	0,95...0,98	(с крыльчаткой)	
		Защищенный самовентилируемый двигатель	0,25...0,35

На рисунке 1.46 показаны кривые нагрева (I) и охлаждения (II) электродвигателя.

Способы определения установившейся температуры ($\tau_{уст}$), постоянной времени нагрева (T_H) и постоянной времени охлаждения ($T_{охл}$). За установившуюся температуру ($\tau_{уст}$) принимают температуру, которая может изменяться за один час на один градус. Ее определяют по полученной экспериментальной кривой нагрева следующим образом (рис. 1.47):

1) выделяют равные промежутки времени: Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 и из концов отрезков восстанавливают перпендикуляры до пересечения с кривой нагрева в точках 1; 2 и 3;

2) находят соответствующие каждому отрезку времени Δt приращения температуры: Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 ;

3) через точки 1, 2 и 3 проводят горизонтальные линии до пересечения с осью ординат в точках 1', 2' и 3';

4) откладывают отрезок 1' — 1'', равный Δt_1 , отрезок 2' — 2'', равный Δt_2 , и отрезок 3' — 3'', равный Δt_3 ;

5) через точки 1'', 2'', 3'' проводят прямую, которая пересекает ось ординат в точке, соответствующей $\tau_{уст}$.

Постоянная времени нагрева (T_H) — время, в течение которого двигатель нагрелся бы до $\tau_{уст}$, не отдавая теплоту в окружающую среду. Ее находят следующими методами.

Метод касательной. На кривой нагрева I, лучше во второй ее половине, произвольно берут точку, например A (рис. 1.48). Через нее проводят касательную 2, которая пересекает прямую 3, соответствующую установившейся температуре ($\tau_{уст}$), в точке A'. Длина отрезка A' — A'' численно равна постоянной времени нагрева T_H .

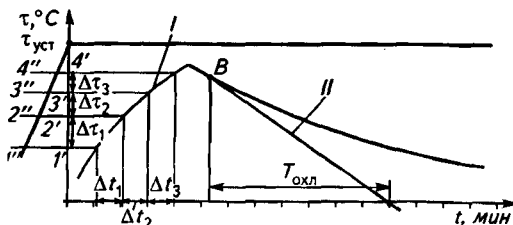


Рис. 1.47. Определение установившейся температуры ($\tau_{уст}$) по кривой нагрева:

I — кривая нагрева; II — кривая охлаждения; $T_{охл}$ — постоянная времени охлаждения

Если по оси ординат отложить $\tau = 0,632 \tau_{уст}$, то, используя кривую нагрева, находят, что этому превышению температуры соответствует время, равное T_H . Аналогично, откладывая отрезок $\tau = 0,368 \tau_{уст}$ по кривой охлаждения находят время, соответствующее $T_{охл}$.

По трем точкам экспериментальной кривой нагрева. Если $\tau_{уст}$ неизвестно, то T_H можно найти по трем точкам экспериментальной кривой нагрева (см. рис. 1.48) по формуле

$$T_H = \frac{\Delta t}{\ln[(\tau_2 - \tau_1)/(\tau_3 - \tau_2)]}$$

где Δt — отрезок времени (график), $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ — превышение температуры.

По формуле (1.84).

Постоянную времени охлаждения ($T_{охл}$) находят по кривой охлаждения (II) (см. рис. 1.47). На кривой охлаждения, лучше в ее начале, произвольно берут точку, например B , через нее опускают перпендикуляр и одновременно проводят касательную до пересечения с осью времени и находят $T_{охл}$.

1.6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В соответствии с ГОСТом принимают следующие типовые режимы работы электроприводов.

Продолжительный режим (типовой режим S1) — режим работы с постоянной нагрузкой и продолжительностью, достаточной для достижения теплового равновесия (рис. 1.49).

Кратковременный режим (типовой режим S2) — режим работы с постоянной нагрузкой в течение определенного времени ($t_{раб}$), недостаточного для достижения теплового равновесия, за которым

Рис. 1.49. Типовой режим S1 (продолжительный режим):

P — мощность; N — период работы при постоянной нагрузке; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{max} — максимально допустимая температура

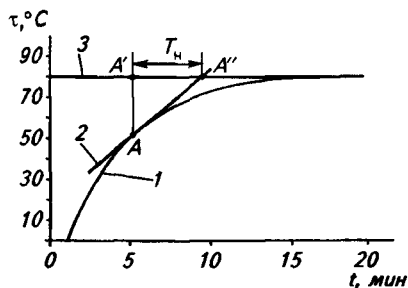
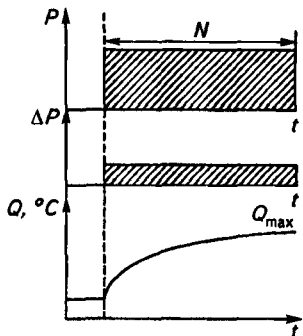


Рис. 1.48. Определение постоянной времени нагрева электродвигателя (T_H)



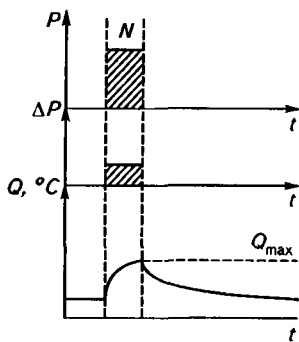


Рис. 1.50. Типовой режим S2 (кратковременный режим):

P — мощность; N — период работы при постоянной нагрузке; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимально допустимая температура, достигнутая в течение цикла

следует состояние покоя в течение времени ($t_{\text{пауз}}$), достаточного для того, чтобы температура машины сравнялась с температурой охлаждающей среды с точностью до 2 К (рис. 1.50). Характерной величиной в этом режиме служит продолжительность работы, составляющая 10, 30, 60 и 90 мин.

Периодический кратковременный режим (типовой режим S3) — последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода работы с постоянной нагрузкой и периода покоя (рис. 1.51). За время работы машины ($t_{\text{раб}}$) двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы ($t_{\text{пауз}}$) не успевает охладиться до температуры окружающей среды. В этом режиме цикл работы таков, что пусковой ток не оказывает заметного влияния на превышение температуры. При этом продолжительность цикла недостаточна для теплового равнове-

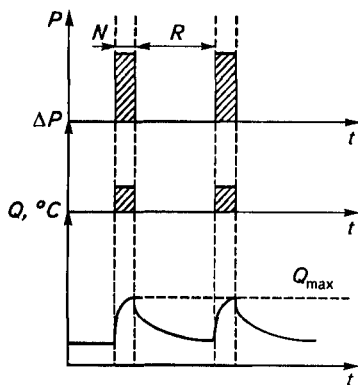


Рис. 1.51. Типовой режим S3 (периодический кратковременный режим):

P — мощность; N — период работы при постоянной нагрузке; R — период состояния покоя; $N + R$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимальная температура, достигнутая в течение цикла (продолжительность включения, %:

$$\text{ПВ} = \frac{N}{N + R} \cdot 100 \%$$

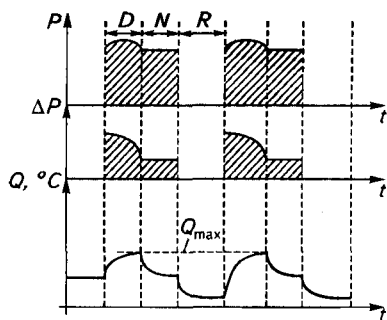


Рис. 1.52. Типовой режим S4 (периодический кратковременный режим с пусками):

P — мощность; N — период работы при постоянной нагрузке; R — период состояния покоя; $D + N + R$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимальная температура, достигнутая в течение цикла (продолжительность включения, %:

$$\text{ПВ} = \frac{D + N}{D + N + R} \cdot 100 \%$$

сия. Важная характеристика этого режима — продолжительность включения (ПВ):

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}}} \cdot 100 \%,$$

где $t_{\text{раб}}$ — время работы; $t_{\text{пауз}}$ — время отключения.

ПВ принимает следующие значения: 15, 25, 40, 60 %. Если нет оговорок, то продолжительность одного цикла ($t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}}$) принимают равной 10 мин.

Периодический кратковременный режим с пусками (типовой режим S4) — последовательность одинаковых рабочих циклов, включающих достаточно длительный период пуска, период работы с постоянной нагрузкой и периода покоя (рис. 1.52). При этом продолжительность цикла недостаточна для достижения теплового равновесия.

Периодический кратковременный режим с электрическим торможением (типовой режим S5) — последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода пуска, периода работы с постоянной нагрузкой, периода быстрого электрического торможения и периода покоя (рис. 1.53).

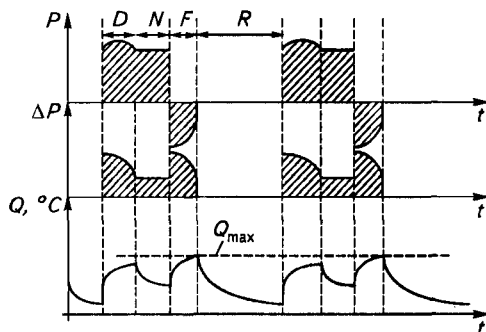
Периодический непрерывный режим с кратковременной нагрузкой (типовой режим S6) — последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода работы с постоянной нагрузкой и периода холостого хода. Период покоя отсутствует (рис. 1.54).

Периодический непрерывный режим с электрическим торможением (типовой режим S7) — последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода пуска, периода работы с постоянной нагрузкой и периода электрического торможения. Период покоя отсутствует (рис. 1.55).

Рис. 1.53. Типовой режим S5 (периодический кратковременный режим с электрическим торможением):

P — мощность; D — период пуска; N — период работы при постоянной нагрузке; R — период состояния покоя; F — период электрического торможения; $D + N + R$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{max} — максимальная температура, достигнутая в течение цикла (продолжительность включения, %):

$$\text{ПВ} = \frac{D + N + F}{D + N + F + R} 100 \%$$



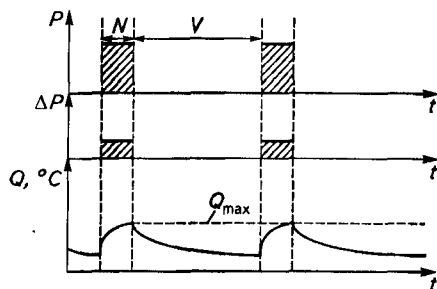


Рис. 1.54. Типовой режим S6 (периодический непрерывный режим с кратковременной нагрузкой):

P — мощность; N — период работы при постоянной нагрузке; V — период холостого хода; $N + V$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимально допустимая температура, достигнутая в течение цикла (продолжительность включения, %:

$$ПВ = \frac{N}{N+V} 100\%$$

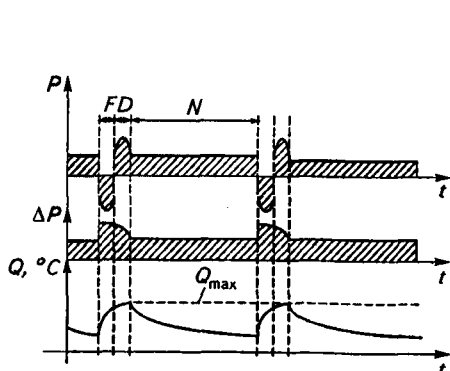


Рис. 1.55. Типовой режим S7 (периодический непрерывный режим с электрическим торможением):

P — мощность; D — период пуска; N — период работы при постоянной нагрузке; F — период электрического торможения; $D + N + F$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимально допустимая температура, достигнутая в течение цикла (продолжительность включения, %: ПВ = 100 %)

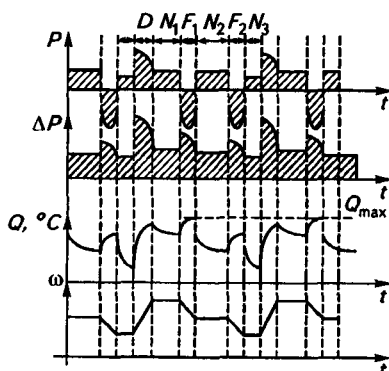


Рис. 1.56. Типовой режим S8 (периодический непрерывный режим с одно-временным изменением нагрузки и угловой скорости):

P — мощность; D — период пуска; F_1, F_2 — период электрического торможения; N_1, N_2, N_3 — период работы при постоянной нагрузке; $D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3$ — период цикла; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимально допустимая температура, достигнутая в течение цикла; ω — угловая скорость (продолжительность включения, %:

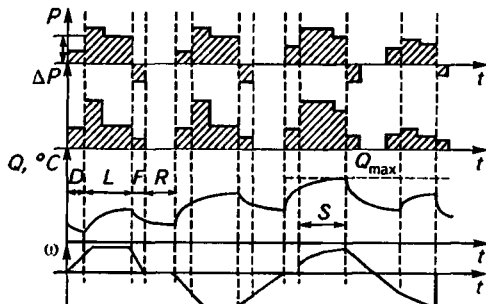
$$ПВ = \frac{D + N_1}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$$

$$ПВ = \frac{F_1 + N_2}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$$

$$ПВ = \frac{F_2 + N_3}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$$

Рис. 1.57. Типовой режим S9 (режим с непериодическим изменением нагрузки и угловой скорости):

P — мощность; D — период пуска; L — период работы при переменной нагрузке; F — период электрического торможения; R — период состояния покоя; S — период работы при перегрузке; ΔP — потери мощности; Q — температура; Q_{\max} — максимальная температура, достигнутая в течение цикла; ω — угловая скорость



Периодический непрерывный режим с одновременным изменением нагрузки и частоты вращения (типовой режим S8) — последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода работы с постоянной нагрузкой, соответствующей заданной частоте вращения, за которым следует период или несколько периодов работы с другими постоянными нагрузками, соответствующими различным частотам вращения (которые достигаются изменением числа полюсов в случае асинхронных электродвигателей). Период покоя отсутствует (рис. 1.56).

Режим с непериодическим изменением нагрузки и частоты вращения (типовой режим S9) — режим работы, при котором нагрузка и частота вращения обычно изменяются непериодически в пределах допустимого рабочего диапазона. Этот режим часто включает в себя перегрузки, которые могут значительно превышать полную нагрузку (или полные нагрузки) (рис. 1.57).

У периодических типовых режимов (S3...S8) продолжительность цикла должна составлять 10 мин, а продолжительность включения следует выбирать из ряда 15, 25, 40, 60 %.

Для типовых режимов S1 и S9, кроме их сокращенного обозначения, никаких дополнительных указаний не требуется.

Для типового режима S2 после сокращенного обозначения следует указывать продолжительность режима. Для типовых режимов S3 и S6 после сокращенных обозначений следует указывать продолжительность включения. Например: S2 — 60 мин; S3 — 25 %; S6 — 40 %.

1.6.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Выбор мощности электродвигателя для длительного режима работы. Различают длительные постоянную и переменную нагрузки.

Нагрузки для хорошо изученных электроприводов, работающих в *длительном постоянном режиме*, рассчитывают по извест-

ным формулам. Мощность нагрузки для осевого или центробежного вентилятора, Вт,

$$P = \frac{QH}{\eta_{\text{в}}\eta_{\text{пер}}}, \quad (1.75)$$

где Q — подача вентилятора, м³/с; H — давление, развиваемое вентилятором, Па (1 Па = 0,102 мм вод. ст.); $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент полезного действия (КПД) вентилятора, $\eta_{\text{в}} = 0,5...0,85$ (большие значения КПД соответствуют мощным вентиляторам); $\eta_{\text{пер}}$ — КПД механической передачи: для клиноременной передачи — 0,85...0,95, для посадки рабочего колеса вентилятора на вал двигателя — 1.

Мощность нагрузки для насоса, подающего жидкость, Вт,

$$P = \frac{9,81QH\rho}{\eta_{\text{в}}\eta_{\text{пер}}}, \quad (1.76)$$

где Q — подача вентилятора, м³/с; H — давление, развиваемое насосом, мм вод. ст.; ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³ (для воды $\rho = 1000$ кг/м³); $\eta_{\text{в}}$ — КПД насоса: для поршневых — 0,65...0,85, для центробежных — 0,6...0,8, для вихревых — 0,3...0,5 (большие значения КПД соответствуют более мощным насосам); $\eta_{\text{пер}}$ — КПД механической передачи.

Мощность нагрузки для транспортера, Вт,

$$P = \frac{9,81Q(cL \pm H)}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (1.77)$$

где Q — подача транспортера, кг/с; c — коэффициент сопротивления движению (табл. 1.8); L — длина транспортера по горизонтали, м; H — высота перемещения груза (плюс — вверх, минус — вниз), м; $\eta_{\text{пер}}$ — общий КПД всех механических передач, значения которого для разных типов передач приведены в таблице 1.9.

1.8. Коэффициент сопротивления движению

Тип транспортера	Коэффициент c
Ленточный	0,26...0,33
Скребокный с роликовыми цепями	0,7...2,25
Скребокный с безроликовыми цепями	1,6...4,2
Винтовой транспортер при перемещении сухой земли или песка	2,5
Винтовой транспортер при перемещении цемента, глины, извести	4,0

1.9. Коэффициент полезного действия для разных видов механических передач

Тип передачи	КПД
С подшипниками скольжения	0,94...0,97
С подшипниками качения	0,98...0,99
Цилиндрическая передача	0,96...0,99
Червячная	0,6...0,8
Клиноременная	0,85...0,95
Фрикционная	0,7...0,8

Мощность нагрузки для режущего механизма, Вт,

$$P = F_p v_p / \eta_{\text{пер}}, \quad (1.78)$$

где F_p — усилие резания, Н; v_p — скорость резания, м/с; $\eta_{\text{пер}}$ — общий КПД механической передачи.

Мощность нагрузки для механизма с поступательным движением, Вт,

$$P = \mu Gv / \eta_{\text{пер}}, \quad (1.79)$$

где μ — коэффициент трения-движения, равный тангенсу угла наклона поверхности движения к горизонту, при котором под действием массы механизма он начинает равномерное движение; G — общий перемещаемый вес, Н; v — скорость перемещения, м/с; $\eta_{\text{пер}}$ — общий КПД механической передачи.

Мощность нагрузки для грузоподъемных механизмов, Вт,

$$P = \frac{Gv}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (1.80)$$

где G — общий вес поднимаемого груза, Н; v — скорость подъема груза, м/с; $\eta_{\text{пер}}$ — общий КПД механических передач.

Выбранные двигатели проверяются только по пусковому моменту, так как большинство рабочих машин имеют повышенный момент трогания,

$$M_{\text{пуск.дв}} = \lambda_{\text{пуск}} M_{\text{ном.дв}} \geq (1,2 \dots 1,5) M_{\text{тр.р.м}},$$

где $M_{\text{пуск.дв}}$ — пусковой момент электродвигателя; $\lambda_{\text{пуск}}$ — кратность пускового момента электродвигателя, $\lambda_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск.дв}} / M_{\text{ном.дв}}$; $M_{\text{тр.р.м}}$ — момент трогания рабочей машины.

При работе электропривода с *длительной переменной нагрузкой* (с частыми разгонами и торможениями) мощность электрического двигателя определяют *методом среднеквадратической, или эквивалентной, мощности*. Это объясняется тем, что квадрат потерь в двигателе пропорционален току двигателя. Так как нагрев — главный фактор, определяющий мощность двигателя, двигатель выбирают по средним потерям мощности, соответствующим нагрузочной диаграмме (рис. 1.58).

Именно средние потери мощности и определяют фактический перегрев двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$\Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\text{ср}} / \rho_m, \quad (1.81)$$

где $\Delta P_{\text{ном}}$ — номинальные потери мощности в электродвигателе; $\Delta P_{\text{ср}}$ — средние потери мощности в электродвигателе; ρ_m — коэффициент механической перегрузки.

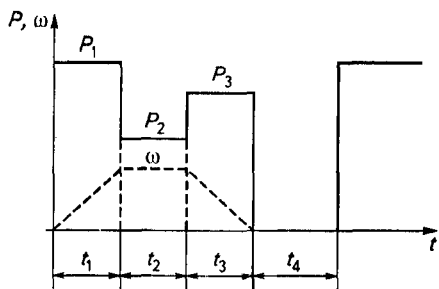


Рис. 1.58. Диаграмма изменения скорости (ω) и график потерь в электродвигателе (P)

тервалов и пауз. Значения коэффициентов α и β приведены в табл. 1.10 и 1.7 соответственно.

Коэффициент механической перегрузки

$$p_M = \sqrt{p_T}, \quad (1.83)$$

где p_T — коэффициент тепловой перегрузки, $p_T = 1/(1 - e^{-t_{\text{рлб}}/T_H})$; $e = 2,73$ — основание натурального логарифма; $t_{\text{рлб}}$ — время работы; T_H — постоянная времени нагрева.

Постоянная времени нагрева (T_H) — это время, за которое двигатель нагрелся бы до установившейся температуры, не отдавая теплоту в окружающую среду,

$$T_H = \frac{6m\tau_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})}, \quad (1.84)$$

где m — масса электродвигателя, кг; $\tau_{\text{ном}}$ — номинальное превышение температуры обмотки статора электродвигателя, измеренное методом сопротивления, °C (см. табл. 1.6); $\eta_{\text{ном}}$ — номинальный КПД электродвигателя; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность электродвигателя, Вт.

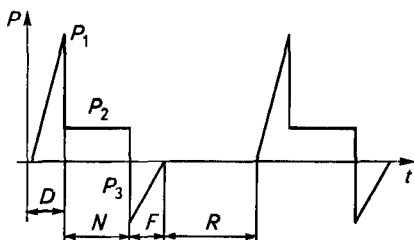


Рис. 1.59. Нагрузочная диаграмма режима S3:

P — мощность; D — период пуска; N — период работы при постоянной нагрузке; F — период электрического торможения; R — период состояния покоя

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}. \quad (1.85)$$

Средние потери мощности в электродвигателе

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i}, \quad (1.86)$$

где ΔP_i — потери мощности в электроприводе для i -го участка работы;

$$\Delta P_i = P_i \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (1.87)$$

где P_i — фактическая нагрузка на валу электродвигателя на i -м участке (см. рис. 1.59); η_i — КПД электродвигателя на i -м участке,

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} \right) \frac{\alpha / x + x}{\alpha + 1}}, \quad (1.88)$$

где α — отношение постоянных потерь мощности электродвигателя к переменным (см. табл. 1.10); x — нагрузка электродвигателя, $x = P_i / P_{\text{ном}}$.

1.10. Коэффициент α

Тип электрической машины	α	Тип электрической машины	α
Двигатель постоянного тока: параллельного возбуждения последовательного возбуждения	1	Асинхронный электродвигатель	0,5...0,7
	0,5...0,7	Синхронный электродвигатель	1,5...2,0

Длительный режим работы характерен для электропривода электроустановок насосов, компрессоров, вентиляторов. Пуск и остановка этих электроустановок происходит редко. Следовательно, пусковые и тормозные процессы практически не влияют на процесс нагрева обмоток электродвигателя. Поэтому *номинальную мощность* определяют непосредственно по *усредненной статической мощности* с учетом потерь в механической передаче.

Если в нагрузочной диаграмме имеются участки, соответствующие

щие работе с пониженной скоростью, а также участки, соответствующие пусковым и тормозным режимам, то рекомендуется учитывать ухудшение теплоотдачи введением коэффициентов α и β в формулу средних потерь, что уменьшит суммарное время и увеличит расчетные значения средних потерь.

Используя *метод средних потерь*, получают удовлетворительные результаты. Его недостаток — необходимость иметь данные о потерях в электродвигателе и большие затраты времени для расчета. Удобнее использовать *методы эквивалентного тока и эквивалентного момента*, которые непосредственно вытекают из метода средних потерь.

Метод эквивалентного тока. В длительном режиме электродвигатель будет работать без перегрева при эквивалентном токе ($I_{\text{ЭКВ}}$), определяемом по формуле

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n I^2 t_i}{\sum_1^n t_i}}. \quad (1.89)$$

В числитель выражения (1.89) входят квадраты тока на отдельных участках, а в знаменатель — время рабочего цикла с учетом пауз. Если в рабочем цикле имеются участки с пониженной скоростью (участки разгона и торможения, а также паузы), то необходимо учитывать ухудшение условий охлаждения на них. Для этого можно, как и в методе средних потерь, вводить поправочные коэффициенты. С учетом этого выражение (1.89) для работы электродвигателя в режиме, приведенном на рисунке 1.59, примет вид:

$$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{\alpha(t_1 + t_3) + t_2 + \beta t_4}}.$$

Метод эквивалентного тока применяют для электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

Метод эквивалентного момента. Вместо метода эквивалентного тока удобнее использовать метод эквивалентного момента, так как нагрузочные диаграммы рабочих машин чаще описывают зависимость момента от времени. Формула для определения эквивалентного момента

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} M^2 t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}. \quad (1.90)$$

При пуске и торможении следует вносить указанные выше коэффициенты.

Метод эквивалентного момента применим для электроприводов с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения при $\Phi = \text{const}$ и для асинхронных электродвигателей в том случае, когда фактический коэффициент мощности незначительно отличается от номинального.

Метод эквивалентной мощности. Если электропривод работает с незначительно изменяющейся скоростью, то мощность пропорциональна моменту. Поэтому расчет можно вести по эквивалентной мощности, описываемой формулой (1.91).

Эквивалентная мощность — постоянная мощность, при которой потери в двигателе равны средним потерям действительного переменного графика нагрузки,

$$P_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}. \quad (1.91)$$

Выбор мощности электродвигателя для кратковременного режима работы. При кратковременном режиме электродвигатель может работать с большими нагрузками, при этом к концу работы температура изоляции должна достигнуть предельно допустимой $\tau_{\text{доп}}$. Упрощенный график потерь в электродвигателе и кривая изменения температуры представлены на рисунке 1.50.

В кратковременном режиме целесообразно использовать специальные электродвигатели, способные преодолевать существенные перегрузки при пуске и торможении. Электродвигатель для кратковременного режима должен иметь более мощный коллектор (для машин постоянного тока) или больший максимальный (критический) момент (для асинхронной машины). Использовать электродвигатель, предназначенный для длительного режима, в кратковременном режиме нецелесообразно по энергетическим соображениям, так как у него снижается КПД. У таких электродвигателей КПД максимален только при номинальном режиме, когда постоянные и переменные потери равны.

Вместе с этим в сельском хозяйстве часто для работы в кратковременном режиме S2 используют электродвигатели, рассчитанные на длительный режим S1. При правильной эксплуатации электродвигателя в этом случае предполагают, что максимальная температура нагрева изоляции не превышает допустимую. Приведем методику выбора электродвигателя, рассчитанного на длительный режим работы S1, но эксплуатируемого в режиме S2.

Последовательность расчета

1. По нагрузочной диаграмме (см., например, рис. 1.50) определяют $P_{\text{экр}}$ по формуле (1.91).

2. По $P_{\text{экр}}$ предварительно выбирают электродвигатель, мощность которого должна быть $P_{\text{дв}} = (1,1 \dots 1,3) P_{\text{экр}}$, и записывают его каталожные (паспортные) данные.

3. Определяют постоянную времени нагрева по кривой нагрева или по формуле (1.84).

4. Определяют коэффициенты термической (p_T) и механической (p_M) перегрузок по следующим формулам:

коэффициент термической перегрузки

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-t_{\text{раб}}/T_n}}, \quad (1.92)$$

коэффициент механической перегрузки

$$p_M = \sqrt{(\alpha + 1)p_T} - \alpha, \quad (1.93)$$

где α — коэффициент (см. табл. 1.10).

5. Определяют мощность электродвигателя, сконструированного для режима S1, но работающего в режиме S2:

$$P_{\text{дв}} \geq P_{\text{экр}}/p_M, \quad (1.94)$$

6. Проверяют выбранный электродвигатель по пусковому моменту:

$$M_{\text{пуск.дв}} \geq (1,2 \dots 1,3) M_{\text{тр.р.м}}$$

или

$$\alpha_1 M_{\text{пуск.дв}} \geq M_{\text{тр.р.м}}, \quad (1.95)$$

где α_1 — коэффициент, учитывающий снижение напряжения (до 30 %) на зажимах пускаемого двигателя; $M_{\text{пуск.дв}}$ — пусковой момент двигателя, $M_{\text{пуск.дв}} = \mu_{\text{пуск}} M_{\text{ном}}$; $\mu_{\text{пуск}}$ — кратность пускового момента (из каталога); $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя, $M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}}$; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя, Вт (из каталога); $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная угловая скорость электродвигателя (из каталога); $M_{\text{тр.р.м}}$ — момент трогания рабочей машины (из нагрузочной диаграммы рабочей машины для нулевого значения ее скорости);

по перегрузочной способности:

$$\alpha_2 M_{\text{макс.дв}} \geq M_{\text{макс.р.м}}, \quad (1.96)$$

где α_2 — коэффициент, учитывающий снижение напряжения на зажимах работающего двигателя (до 10 %) при включении в сеть мощного электродвигателя; $M_{\text{макс.дв}}$ — максимальный момент, развиваемый двигателем, $M_{\text{макс.дв}} = \mu_{\text{макс}} M_{\text{ном}}$;

$n_{\text{макс}}$ — кратность максимального (критического) момента (из каталога);
 $M_{\text{макс.р.м}}$ — максимальный момент рабочей машины (из каталога).

Если нагрузка задана мощностью, то $P_{\text{макс.р.м.}} = M_{\text{макс.р.м.}} \omega_{\text{кр}}$.
 При этом $\omega_{\text{кр}} = \omega_0 (1 - S_{\text{кр}})$, а

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} (\mu_{\text{макс}} + \sqrt{\mu_{\text{макс}}^2 - 1}).$$

Выбор мощности электродвигателя для повторно-кратковременного режима работы (периодический кратковременный режим S3). График работы электродвигателя в повторно-кратковременном режиме представлен на рисунке 1.51. На практике в каждом цикле имеются участки пуска, торможения.

При выборе двигателя для этих режимов работы необходимо учитывать продолжительность включения (ПВ)

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}}} \cdot 100 \% = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 \%, \quad (1.97)$$

где $t_{\text{раб}}$, $t_{\text{пауз}}$, $t_{\text{ц}}$ — продолжительность рабочего периода, пауз и цикла в работе двигателя соответственно, мин.

Величину ПВ выражают в процентах. ГОСТом установлены следующие ее расчетные значения: 15, 25, 40 и 60 %. Продолжительность одного цикла ($t_{\text{ц}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}}$) не должна превышать 10 мин.

Для типового режима S3 вводят также понятие относительной продолжительности включения (ϵ'), которую с учетом ухудшения условий охлаждения во время паузы определяют по формуле

$$\epsilon' = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + \beta t_{\text{пауз}}}, \quad (1.98)$$

где β — коэффициент (см. табл. 1.7).

Для повторно-кратковременного режима также необходимо выбирать специальные двигатели с улучшенными динамическими характеристиками, т. е. с удлиненным якорем или ротором (с большим отношением длины к диаметру), что обеспечивает снижение момента инерции.

Номинальную относительную продолжительность включения ϵ' двигателей для повторно-кратковременного режима принимают равной 40 %. Также в справочной литературе приводят данные о мощности, токе, скорости для величин ϵ' , равных 15, 25, 60 и 100 %. Согласно ГОСТу длительность цикла работы двигателя в этом режиме не должна превышать 10 минут. В сельском хозяй-

стве для режима S3 в виде исключения могут быть использованы двигатели, рассчитанные для длительного режима работы S1. Поэтому приведем методику выбора двигателя, рассчитанного на длительный режим работы S1, но эксплуатируемого в повторно-кратковременном режиме S3.

Последовательность расчета

1. По нагрузочной диаграмме определяют $P_{\text{экв}}$ или $M_{\text{экв}}$.
2. Ориентировочно определяют мощность двигателя по формуле $P_{\text{дв}} = (1, 1 \dots 1, 2) P_{\text{экв}}$ и записывают его каталожные данные.
3. Определяют постоянную времени нагрева $T_{\text{н}}$ по формуле (1.84) или по кривой нагрева.
4. Рассчитывают постоянную времени охлаждения $T_{\text{охл}}$ по кривой охлаждения или по формуле

$$T_{\text{охл}} = T_{\text{н}}/\beta, \quad (1.99)$$

где β — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоря) (см. табл. 1.7).

5. Находят коэффициент термической перегрузки

$$K_{\text{т}} = \frac{1 - e^{-[(t_{\text{раб}}/T_{\text{н}}) + (t_{\text{науз}}/T_{\text{охл}})]}}{1 - e^{-t_{\text{раб}}/T_{\text{н}}}}. \quad (1.100)$$

6. Рассчитывают коэффициент механической перегрузки

$$K_{\text{м}} = \sqrt{(\alpha + 1)K_{\text{т}} - \alpha}, \quad (1.101)$$

где α — коэффициент (см. табл. 1.10).

7. Определяют мощность двигателя, рассчитанного для работы в режиме S1, но эксплуатируемого в режиме S3

$$P_{\text{дв}} \geq P_{\text{экв}}/K_{\text{м}}. \quad (1.102)$$

8. Проверяют выбранный двигатель:
 - по пусковому моменту, формула (1.95);
 - по перегрузочной способности, формула (1.96);
 - по нагреву с учетом допустимого числа включения двигателя в час:

$$Z_{\text{доп}} \geq Z_{\text{факт}}, \quad (1.103)$$

где $Z_{\text{доп}}$, $Z_{\text{факт}}$ — соответственно допустимое и фактическое включение двигателя в час.

Допустимое число включений

$$Z_{\text{доп}} = \frac{3600 \Delta P_{\text{ном}} \beta (1 - \epsilon)}{0,97 (\Delta A_{\text{пуск}} + \Delta A_{\text{торм}})}, \quad (1.104)$$

где $\Delta P_{\text{ном}}$ — номинальные потери мощности в двигателе, $\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}}$; $P_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$ — соответственно номинальная мощность и номинальный КПД двигателя; β — коэффициент, характеризующий ухудшение теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре), определяемый по табл. 1.7; ϵ — относительная продолжительность включения двигателя, $\epsilon = t_{\text{раб}}/(t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}})$; $\Delta A_{\text{пуск}}$ — потери энергии при пуске двигателя, Дж, $\Delta A_{\text{пуск}} = J\omega_0^2$; J — момент инерции двигателя, кг·м²; ω_0 — синхронная угловая скорость, рад/с; $\Delta A_{\text{торм}}$ — потери энергии при торможении, Дж; при динамическом торможении $\Delta A_{\text{торм.дин}} = 1/2 J\omega_0^2$, при торможении противовключением $\Delta A_{\text{торм.пр.вкл}} = 3/2 J\omega_0^2$.

Фактическое число включений

$$Z_{\text{факт}} = 3600/t_{\text{цикл}}, \quad (1.105)$$

где $t_{\text{цикл}}$ — длительность цикла, с, $t_{\text{цикл}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{пауз}}$.

Выбор специального электродвигателя для режима S3. Для режима работы, изображенного на рисунке 1.59, определяют: фактическую продолжительность включения

$$\text{ПВ}_{\text{факт}} = \frac{D + N + F}{D + N + F + R} \cdot 100\%; \quad (1.106)$$

необходимую мощность двигателя как эквивалентную без учета паузы

$$P_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{P_1^2 D + P_2^2 N + P_3^2 F}{D + N + F}} \quad (1.107)$$

или как эквивалентную за полный цикл работы с учетом паузы

$$P_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{P_1^2 D + P_2^2 N + P_3^2 F}{0,75D + N + 0,75F + 0,5R}}$$

которые затем пересчитывают от $\text{ПВ}_{\text{факт}}$ или $\text{ПВ} = 100\%$ (при длительной нагрузке $P_{\text{дл}}$) на стандартную $\text{ПВ}_{\text{ст}}$, ближайшую к $\text{ПВ}_{\text{факт}}$, по формуле

$$P_{\text{ст}} \sqrt{\epsilon_{\text{ст}}} = P_{\text{факт}} \sqrt{\epsilon_{\text{факт}}}. \quad (1.108)$$

Следовательно, требуемая мощность специального двигателя

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{факт}} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{факт}}}{\epsilon_{\text{ст}}}}, \quad (1.109)$$

где $\epsilon_{\text{ст}}$ — стандартная относительная продолжительность включения, принимающая значения 0,15; 0,25; 0,40; 0,60.

Если использовалась эквивалентная мощность за полный цикл работы, то

$$P_{\text{ст}} \sqrt{\epsilon_{\text{ст}}} = P_{\text{дл}} \sqrt{\epsilon_{\text{дл}}},$$

и требуемую мощность стандартного двигателя находят по формуле

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{дл}} / \sqrt{\epsilon_{\text{факт}}}. \quad (1.110)$$

Применение двигателя для повторно-кратковременного режима для привода с трапецеидальной диаграммой скорости при больших значениях ПВ приводит к перерасходу энергии, так как он не рассчитан на такой режим и будет работать с низким КПД. В этом случае целесообразнее использовать двигатель для длительного режима работы, но следует учитывать, что метод эквивалентного тока будет давать при расчетах существенную погрешность, поэтому рекомендуется проводить расчет по методу средних потерь.

В приводах машин, имеющих в нагрузочных диаграммах значительные скачки, а также в установках с большим числом включений в час рекомендуется использовать двигатели повышенного скольжения.

1.6.4. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Электропривод рабочих машин и механизмов выбирают по следующим показателям.

По роду тока и значению напряжения. В этом случае учитывают данные источника питания и требования технологического процесса. Если требуется плавное регулирование угловой скорости частоты вращения электропривода, то выбирают электропривод постоянного тока или электропривод с асинхронным электродвигателем и частотным преобразователем.

По конструктивному исполнению и защите от воздействия окружающей среды. В этом случае учитывают удобство установки и дальнейшего обслуживания. По

конструктивным особенностям крепления электродвигатели подразделяют на следующие группы: с лапами для крепления, с лапами для крепления и крепежным фланцем на подшипниковом щите, без лап на подшипниковом щите и др. Различают также по конструктивному исполнению конца вала электродвигателей и способу монтажа, который определяет пространственное положение электродвигателя на месте установки, особенности его крепления и соединения с механизмом. Все эти конструктивные особенности отражены в условном обозначении электродвигателя по конструктивному исполнению и особенностям монтажа (см. рис. 1.19).

В сельскохозяйственном производстве электропривод работает в агрессивных условиях (повышенная влажность, запыленность, высокая концентрация аммиака и т. д.). Поэтому целесообразно выбирать электродвигатели и аппаратуру управления специализированного исполнения: по климатическому исполнению и категории размещения (см. табл. 1.1, 1.2).

В случае, когда оборудование и электропривод располагают на открытом воздухе, степень защиты должна быть не ниже IP44.

По угловой скорости электродвигателя и возможности ее регулирования. Электродвигатель выбирают, учитывая технологические требования и скоростные особенности рабочих машин и механизмов.

При этом необходимо учитывать, что чем быстрее двигатель, тем меньше его масса и стоимость, выше его КПД и $\cos \phi$, но увеличиваются затраты на механическое передаточное устройство ввиду необходимости увеличения его передаточного отношения.

Практический опыт и технико-экономические расчеты показывают, что наиболее экономичны электродвигатели с частотой вращения 1500 мин^{-1} .

По мощности электродвигателя. Его для работы электропривода выбирают в соответствии с подразделом 1.6. Это самый ответственный и наиболее трудоемкий этап выбора электродвигателя для привода рабочих машин.

По уровню автоматизации. Ее нужно выполнять с учетом необходимых требований к технологическому процессу, используя при этом дополнительную литературу, посвященную автоматизации технологических процессов, а также с учетом требований к технико-экономическим расчетам.

По надежности работы. *Надежность* электропривода — способность выполнять свои функции в определенных эксплуатационных условиях.

Основная числовая характеристика надежности — *интенсивность отказов*, ч^{-1} ,

$$\lambda = \frac{\Delta n}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (1.111)$$

где Δn — число отказавших систем электроприводов; Δt — время наблюдения за

работой электропривода, ч; $N_{\text{ср}}$ — среднее число работающих электроприводов в интервале времени Δt

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_0 + N_t}{2}, \quad (1.112)$$

где N_0 — число электроприводов, начавших работу; N_t — число электроприводов, безотказно закончивших работу.

Для электроприводов в период нормальной эксплуатации экспериментально установлено, что интенсивность отказов — это постоянное число и вероятность безотказной работы электропривода имеет экспоненциальное распределение

$$P(t) = e^{-\lambda \Delta t}. \quad (1.113)$$

Интенсивность отказов всей системы электропривода определяют на основании данных по интенсивности отказов, отдельно входящих в систему электропривода элементов, повреждение которых ведет к полному нарушению работоспособности электропривода,

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_{i^j}, \quad (1.114)$$

где N — число элементов электропривода.

В этом случае по значению интенсивности отказов *средняя наработка на отказ*, ч,

$$T = 1/\lambda. \quad (1.115)$$

Из формул (1.113)...(1.115) следует, что чем сложнее система электропривода, тем менее надежны входящие в нее элементы и тем меньше вероятность безотказной работы электропривода и наработка системы на отказ.

По эффективности электропривода. Ее оценивают по экономическим показателям путем сравнения приведенных затрат нового варианта электропривода с существующим.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем ограничена электрическая мощность двигателя? 2. Как влияет класс изоляции на мощность двигателя? 3. Что понимают под установившейся температурой? 4. Что понимают под постоянной времени нагрева? 5. Поясните методы определения постоянной времени нагрева. 6. Поясните сущность режимов S1, S2, S3. 7. Каков алгоритм выбора мощности электродвигателя для продолжительного, повторно-кратковременного и кратковременного режимов?

1.7. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Пускорегулирующие и защитные аппараты предназначены для управления электродвигателями (включения, отключения, изменения направления вращения и регулирования угловой скорости) и защиты их от перегрузки, коротких замыканий и т. д. Выпускают различные по назначению и конструкции аппараты управления и защиты.

Для управления асинхронными электродвигателями небольшой мощности используют рубильники, автоматические выключатели, переключатели, кнопочные станции.

1.7.1. АППАРАТУРА НЕАВТОМАТИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ (РУБИЛЬНИКИ, ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ, РУЧНЫЕ ПУСКАТЕЛИ И КНОПКИ УПРАВЛЕНИЯ)

Рубильники, переключатели используют для ручного (неавтоматического) замыкания и размыкания электрических цепей напряжением 380/220 В. Тип рубильника или переключателя может быть обозначен одной, двумя, тремя буквами и двумя цифрами.

Если рубильник или переключатель вместо рукоятки оборудован центральным или боковым рычажным приводом, то его обозначают тремя буквами РПЦ (рубильник с приводом центральным), РПБ (рубильник с приводом боковым) и соответственно ППЦ и ППБ. Например, марка РПБ34 означает: рубильник с приводом боковым, трехполюсный, на номинальный ток 400 А.

1.7.2. АППАРАТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Магнитные пускатели. Магнитные пускатели используют для местного, дистанционного и автоматического управления электроустановкой, а также для защиты электродвигателей от перегрузки (при наличии теплового реле) и нулевой защиты.

Пускатели открытого исполнения размещают в установках и на панелях в закрытых шкафах, нишах и местах, защищенных от попадания пыли и посторонних предметов. Пускатели защищенного исполнения предназначены для установки внутри помещений, в которых окружающая среда не содержит значительного количества пыли. Пускатели пылебрызгонепроницаемого исполнения используют для внутренних и наружных установок в местах, защищенных от солнечных лучей и прямого попадания струй дождя.

Номинальный ток пускателя — наибольший ток продолжительного режима работы. Этот ток определяет условия допустимого

нагрева элементов главной цепи при редких включениях и отключениях контактов. Значения номинального тока пускателя зависят от конструкции контактов и типа оболочки пускателя.

Рабочий ток пускателя — ток, определяемый номинальным током теплового реле, установленного в пускателе.

В настоящее время широко используют магнитные пускатели серии ПМЛ. На рисунке 1.60 представлена структура условного обозначения магнитных пускателей серии ПМЛ, а в таблице 1.11 приведены их технические данные.

Контакторы пускателей на токи 10...63 А имеют прямоходную магнитную систему Ш-образного типа. Подвижная часть электромагнита сдвигает одно целое с траверсой, в которой предусмотрены подвижные контакты и их пружины. Возвратная пружина расположена на среднем корне подвижной части электромагнита. На дугогасительной камере контактора имеются направляющие для встраивания дополнительных приставок: контактного реле типа ПКЛ, кнопки «Пуск» и сигнальной лампочки. Тепловые реле РТЛ устанавливаются непосредственно в корпусе пускателей.

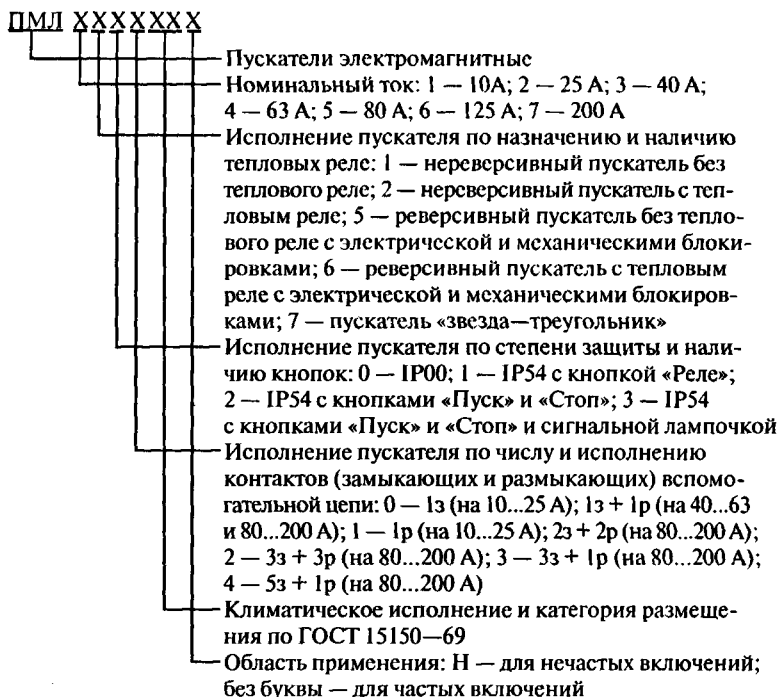


Рис. 1.60. Структура условного обозначения магнитных пускателей серии ПМЛ

1.11. Технические данные магнитных пускателей серии ПМЛ

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальный рабочий ток контактов главной цепи пускателей* в продолжительном и повторно-продолжительном (S3) режимах работы при номинальном токе 10; 25; 40; 63; 80; 125; 200 А соответственно, А:	
при напряжении 500 В для степени защиты: IP00	6; 25; 40; 63; 80; 125; 200
IP54	6; 25; 40; 63; 80; 100; 160
при напряжении 660 В для степени защиты: IP00,	4; 16; 25; 40; 50; 60; 120
IP54	
Количество контактов дополнительной контактной приставки к пускателям на 10; 25; 40; 63 А:	
ПКЛ-2004	2з+0р
ПКЛ-1104	1з+1р
ПКЛ-4004	4з+0р
ПКЛ-2204	2з+2р
ПКЛ-0404	0з+4р
Номинальный ток контактов вспомогательной цепи, А	10
Номинальное напряжение по изоляции, В	660
Номинальное напряжение у втягивающих катушек, В:	24; 36; 42; 110; 127; 220;
частоты 50 Гц	230; 240; 380; 415; 500;
	600
частоты 60 Гц	380; 440
Механическая износостойкость пускателей (без тока в цепи контакторов) при номинальных рабочих токах, равных $I_{ном}$ (режим S3) и напряжении 380 В, в млн циклов:	
10; 25; 40; 63; 80 А, для включений:	
частых	16
нечастых	8
125; 200 А, для включений:	
частых	5
нечастых	5
Частота включений в час для механической износостойкости при $I_{ном}$:	
10; 25; 40; 63; 80 А	3600
125; 200 А	2400
Коммутационная износостойкость контактов главной цепи пускателей при номинальных рабочих токах, равных $I_{ном}$ (режим S3), и напряжении 380 В, млн циклов:	
10; 125 А, для включений:	
частых	3,0
нечастых	1,5
25; 40; 63; 200 А, для включений:	
частых	2,0
нечастых	1,0
80 А, для включений:	
частых	4,0
нечастых	2,0
Частота включения в час для коммутационной износостойкости при $I_{ном}$, А:	
10	2400
25; 40; 63	1200
80; 125; 200	600

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальный рабочий ток, А, (категория применения S4) пускателей для частых включений при напряжении 220; 380; 500; 660 В, при $I_{ном}$, А:	
10	4
25	10
40	16
63	25
80	50
200	60
Коммутационная износостойкость пускателей для частых включений при $I_{ном}$, А, млн циклов:	
10; 25; 40	0,4
63; 80; 125; 200	0,32
Частота включений в час для коммутационной износостойкости пускателей при $I_{ном}$, А, напряжении:	
До 380 В:	
10; 25; 40; 63	1200
80; 125; 200	600
500; 660 В:	
10	1200
25	600
63; 80; 125; 200	300

*Для пускателей с тепловыми реле номинальный рабочий ток определяется по максимальному току продолжительного режима работы реле.

Контакторы пускателей на токи 80...200 А имеют прямоходовую магнитную систему П-образного типа. Контактная система контакторов расположена сбоку от магнитной системы. Подвижная часть электромагнита составляет одно целое с рычагом, передающим движение траверс. На каждом контакторе установлено по два унифицированных узла вспомогательной цепи.

Магнитные пускатели используют для коммутации цепей мощностью до 75 кВт и напряжением до 500 В. Для коммутации цепей мощностью свыше 75 кВт используют контакторы. По току главных контактов магнитные пускатели выбирают из условия:

$$I_{ном} \geq I_{раб}, \quad (1.116)$$

причем номинальный ток берут ближайшим по значению к рабочему току электродвигателя. При этом

$$\begin{aligned} U_{ав} &\geq U_{сети}; \\ U_{кат} &= U_{ц.упр}. \end{aligned} \quad (1.117)$$

Электротепловые токовые реле серии РТЛ. Их применяют для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от перегрузки недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз. Реле

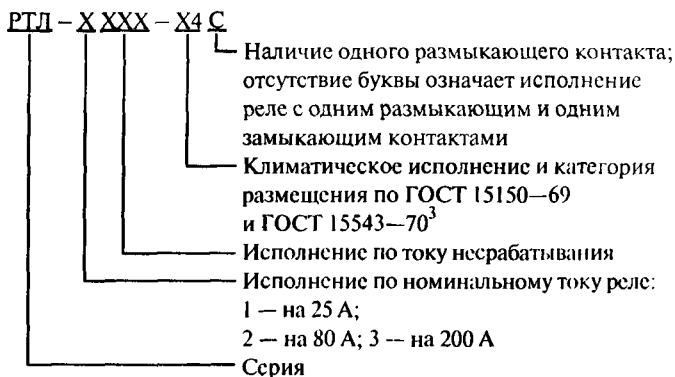


Рис. 1.61. Структура условного обозначения реле РТЛ

типов РТЛ-1000, РТЛ-2000 устанавливаются индивидуально с помощью клеммников КРЛ-104, КРЛ-204 соответственно, а также крепят непосредственно к пускателям серии ПМЛ.

Реле имеют три полюса, температурную компенсацию, механизм для ускоренного срабатывания при обрыве фазы, регулятор тока несрабатывания, ручной возврат, один размыкающий и один замыкающий контакты или один размыкающий контакт, переднее присоединение внешних проводников, вмонтированные нагревательные элементы.

На рисунке 1.61 показана структура условного обозначения реле серии РТЛ, а в таблице 1.12 приведены их технические данные.

1.12. Технические данные тепловых реле серии РТЛ

Тип реле	Пределы регулирования номинального тока несрабатывания, А	Мощность управляемого электродвигателя, кВт, при напряжении, В			
		380	440	500	660
РТЛ-1001	0,1...0,17	—	—	—	—
РТЛ-1002	0,16...0,26	—	—	—	—
РТЛ-1003	0,24...0,4	—	—	—	—
РТЛ-1004	0,38...0,65	—	—	—	0,37
РТЛ-1005	0,61...1,0	—	—	0,37	0,75
РТЛ-1006	0,95...1,6	0,37	—	0,75	1,1
РТЛ-1007	1,5...2,6	0,75	0,75	1,1	1,5
РТЛ-1008	2,4...4,0	1,5	1,5	2	3
РТЛ-1010	3,8...6,0	2,2	2,2	3	4
РТЛ-1012	5,5...8,0	3	3	4	5,5
РТЛ-1014	7,0...10,0	4	3,7	5,5	7,5
РТЛ-1016	9,5...14	5,5	5,5	7,5	10
РТЛ-1021	13...19	7,5	7,5	10	15
РТЛ-1022	18...25	11	11	15	18,5
РТЛ-1053	23...32	15	15	18,5	22
РТЛ-1055	30...41	18,5	18,5	22	30

Тип реле	Пределы регулирования номинального тока несрабатывания, А	Мощность управляемого электродвигателя, кВт, при напряжении, В			
		380	440	500	660
РТЛ-1057	38...52	22	25	30	37
РТЛ-1059	47...64	25	30	37	45
РТЛ-1061	54...74	30	37	46	55
РТЛ-1063	63...86	37	45	50	75
РТЛ-3105	75...105	55	59	75	90
РТЛ-3125	95...125	63	75	80	110
РТЛ-3160	115...160	80	90	110	150
РТЛ-3200	145...200	100	125	125	185

Для формулирования заказа в заявке необходимо указать наименование и типоразмер реле; номер ТУ.

1. Для реле с диапазоном регулирования номинального тока несрабатывания 2,4...4,0 А, с одним размыкающим и одним замыкающим контактами для установки с пускателями серии ПМЛ: реле электротепловое токовое РТЛ-1008 0Х4, ТУ16-523.549—82.

2. Для реле с диапазоном регулирования номинального тока несрабатывания 5,5...8,0 А с одним размыкающим и замыкающим контактами для установки отдельно от пускателя серии ПМЛ с клеммником типа КРЛ-104: реле электротепловое токовое РТЛ-1012 0Х4, ТУ16-522,549—82.

Реле имеют температурную компенсацию и ручной возврат, время которого составляет не менее 90 с.

1.7.3. ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА, УСТРОЙСТВО ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ (УЗО)

Автоматические воздушные выключатели. Они предназначены для автоматического размыкания электрических цепей при перегрузках и коротких замыканиях, при недопустимых снижениях напряжения, а также для нечастого включения и отключения цепей вручную. Механизм, который отключает автоматический выключатель, называют *расцепителем*. Расцепитель может быть: электромагнитный максимального тока (максимальный); тепловой; комбинированный, имеющий и электромагнитный, и тепловой элементы; независимый дистанционный; минимального напряжения.

Максимальный (электромагнитный) расцепитель оттягивает защелку при достижении током определенного значения, и под действием пружины автоматический выключатель разрывает цепь тока.

Расцепитель минимального напряжения при понижении напряжения в сети ниже нормы поворачивает защелку, и под дей-

ствием пружины нож автоматического выключателя разрывает цепь тока.

Дистанционный независимый расцепитель предназначен для дистанционного отключения автоматического выключателя. В сельском хозяйстве широко используют автоматические выключатели типов АП50Б, АЕ2000, А3700, ВА.

Выбор автоматических выключателей. Выключатели выбирают из условий

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{раб}}; \quad (1.118)$$

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{раб}}. \quad (1.119)$$

Номинальный ток теплового расцепителя определяют из условия:

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном.дв}}. \quad (1.120)$$

Ток уставки электромагнитного расцепителя выбирают из условия недопустимости срабатывания расцепителя при пусковых токах электродвигателя

$$I_{\text{уст.эм}} \geq 1,5 I_{\text{пуск.дв}}. \quad (1.121)$$

Ток уставки электромагнитного расцепителя для группы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирают из условия

$$I_{\text{уст.эм}} \geq 1,5 [\Sigma I_{\text{ном.дв}} + (I_{\text{пуск.дв}} - I_{\text{ном.дв}})], \quad (1.122)$$

где $(I_{\text{пуск.дв}} - I_{\text{ном.дв}})$ — разность пускового и номинального токов наиболее мощного электродвигателя, А.

Номинальный ток теплового расцепителя для электродвигателей с длительным режимом работы (S1) и легкими условиями пуска (статический момент механизма не превышает 50 % номинального момента электродвигателя) выбирают из условия

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном.дв}}. \quad (1.123)$$

Кроме того, следует учитывать, что номинальный ток теплового расцепителя для электродвигателей с длительным режимом работы (S1) и тяжелыми условиями пуска выбирают из условия

$$I_{\text{ном.р}} \geq 1,5 I_{\text{ном.дв}}. \quad (1.124)$$

Автоматические выключатели серии АП50Б. Их используют для установки в электрических цепях напряжением до 220 В постоянного и до 500 В (50 и 60 Гц) переменного тока, для защиты при перегрузках и токах короткого замыкания, для нечастых оперативных включений отключений (ВО) до 30 раз в час, для включения

асинхронных электродвигателей. На рисунке 1.62 показана структура условного обозначения автоматических выключателей серии АП50Б, а в таблице 1.13 приведены их технические данные.

Выключатели изготавливают для климатического исполнения У и Т категории 3 и ХЛ категории 5 (в пластмассовой оболочке), степени защиты IP54.

Выключатели под действием электромагнитных расцепителей не отключаются при токе, равном 0,8 тока уставки, и надежно отключаются при токе 1,2 уставки при прохождении переменного тока частотой 50 Гц.

Выключатели под действием максимального расцепителя тока в нулевом проводе не отключаются, когда ток равен или меньше 0,8 номинального, и отключаются, когда ток достигает значения 1,4 номинального. Максимальный расцепитель в нулевом проводе допускает в продолжительном режиме нагрузку 0,6 от $I_{ном.р}$.

Минимальный расцепитель напряжения отключает выключатель при напряжении менее 70...85 % номинального, не отключает при напряжении, большем 70 % номинального, и не препятствует включению при напряжении 85 % номинального и выше.

Независимый расцепитель надежно срабатывает при напряжении от 70 до 120 % номинального и допускает работу с частотой не

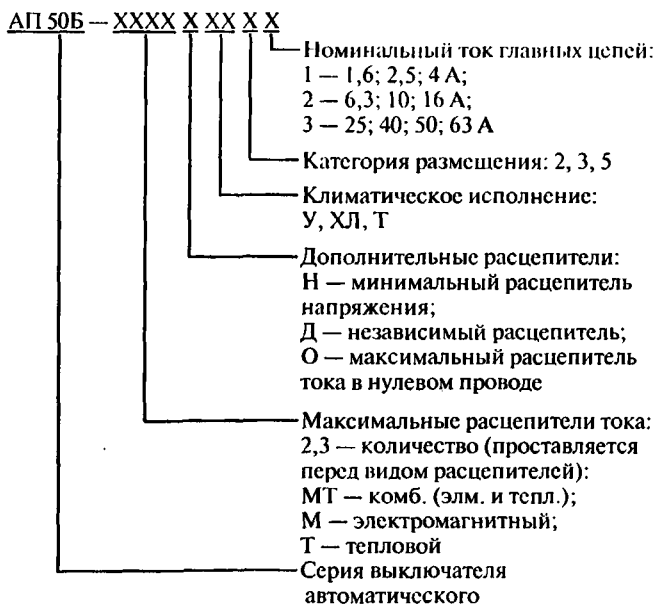


Рис. 1.62. Структура условного обозначения автоматических выключателей серии АП50Б

менее 10 включений подряд с нагрузкой и паузами между двумя последующими включениями не более 15 с.

1.13. Технические данные автоматических выключателей серии АП50Б

Тип выключателя	Последняя цифра в условном обозначении выключателя	Число полюсов	Номинальный ток, А		Номинальное напряжение, В
			теплового расцепителя ($I_{ном.р}$)	электромагнитного расцепителя ($I_{эл.р}$)	
АП50Б2ТМ или АП50Б2М	1	2	1,6; 2,5; 4,0;	3,5 $I_{ном.р}$ или 10 $I_{ном.р}$	Постоянный ток 220 В
	2	2	6,3; 10; 16;		
АП50Б2МН АП50Б3МТ АП50Б3М	3	2	25; 40; 50; 63	3,5 $I_{ном.р}$ или 10 $I_{ном.р}$	Переменный ток частотой 50 и 60 Гц, 500 В
	1	3	1,6; 2,5; 4,0		
АП50Б2М3ТН АП50Б2М3ТД	2	3	6,3; 10; 16	3,5 $I_{ном.р}$ или 10 $I_{ном.р}$	
	2	3	6,3; 10; 16		
АП50Б2М3ТН АП50Б2М3ТД	3	3	25; 40; 50; 63	3,5 $I_{ном.р}$ или 10 $I_{ном.р}$	
	3	3	25; 40; 50; 63		
АП50Б2М3ТО	2	3	16	3,5 $I_{ном.р}$ или 10 $I_{ном.р}$	
	3	3	25; 40; 50; 63		

При формулировании заказа необходимо указать: 1) название и тип исполнения выключателя в соответствии со структурой условного обозначения; 2) номинальный ток; 3) уставку по току мгновенного расцепителя; 4) нормальное напряжение катушки независимого расцепителя или расцепителя минимального напряжения; 5) наличие свободных контактов; 6) номер технических условий.

Автоматические выключатели серии АЕ2000. Они предназначены для защиты электрических цепей от токов перегрузки и токов короткого замыкания, а также для оперативных включений и отключений электрических цепей с частотой до 30 раз в час напряжением до 660 В переменного (50 и 60 Гц) и до 380 В частотой 400 Гц тока.

С помощью автоматических выключателей серии АЕ2000 осуществляют комбинированную защиту электроустановок: тепловую защиту от перегрузок и электромагнитную максимальную от короткого замыкания.

Автоматические выключатели серии АЕ2000 выпускают вместо автоматических выключателей серии АП50, АК63, А63, АК50, АСТ, АЗ161, АЗ163, АЗ110, АЗ120.

Автоматические выключатели АЕ2000 выпускают на токи: АЕ2020 до 16 А, 660 В; АЕ2040 до 63 А, 660 В; АЕ2050 до 100 А, 660 В.

Токовую защиту нулевой последовательности автоматов АЕ2000, АЕ2050 осуществляют с помощью токовых реле РЭ-571 т или ЗТИ-0,4. Структура условного обозначения автоматических выключателей серии АЕ2000 показана на рисунке 1.63, а в таблице 1.14 приведены их технические данные.

Выключатели этих серий предназначены для защиты электрических цепей от токов перегрузки и токов короткого замыкания, а также для оперативных включений электрических цепей с частотой

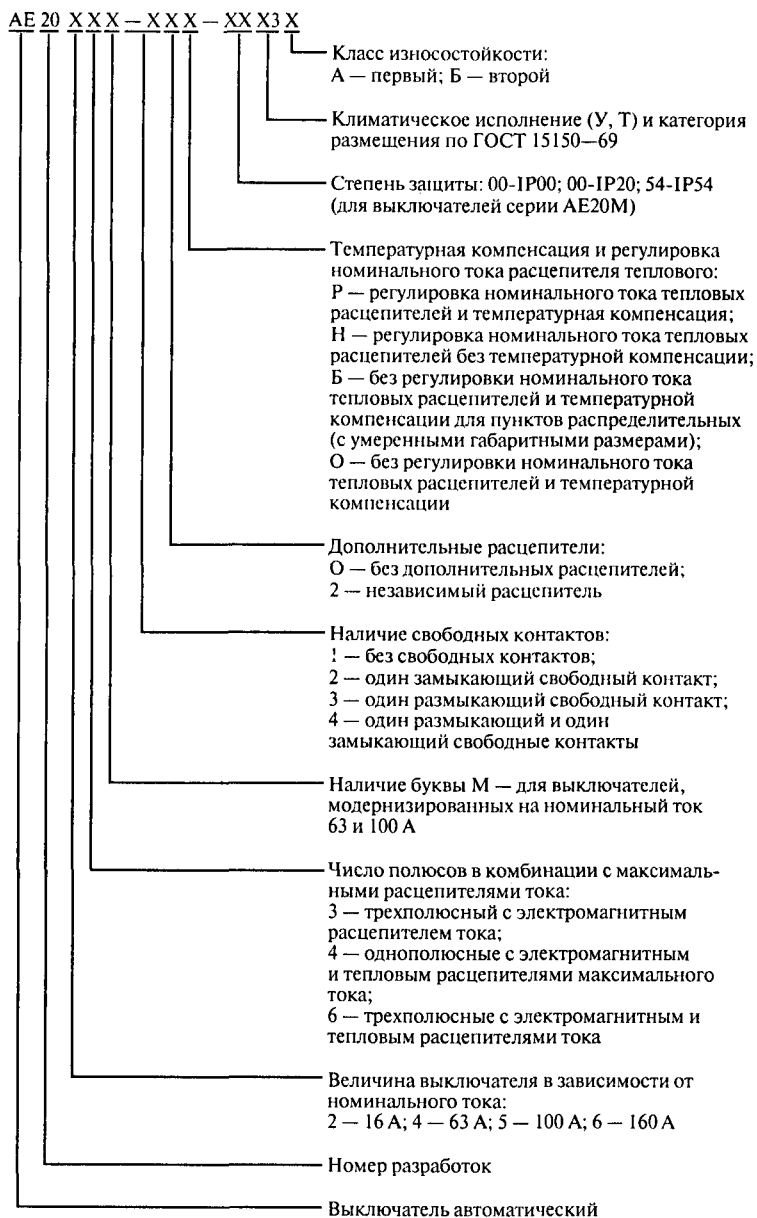


Рис. 1.63. Структура условного обозначения автоматических выключателей серии AE2000

той до 30 раз в час, напряжением до 660 В переменного тока и частотой 50 и 60 Гц и до 380 В частотой 400 Гц.

Выключатели исполнения У категории 3 пригодны для эксплуатации в условиях нормированных для исполнения УХЛ категории 4 и исполнения У, Т и ХЛ категории 2 (в оболочке степени защиты IP54).

По способу защиты от поражения электрическим током выключатели исполняют со степенью защиты IP20, IP00, IP54.

Номинальное напряжение главной цепи переменного тока: для однополюсных выключателей до 440 В; для трехполюсных выключателей до 380 и 660 В частоты 50 и 60 Гц.

1.14. Технические данные выключателей серий АЕ2000 и АЕ2000М

Тип выключателя	Номинальный ток, А		Номинальный ток срабатывания, А	
	автоматического выключателя	теплового расцепителя ($I_{ном.р}$)	теплового расцепителя ($I_{т.р}$)	электромагнитного расцепителя ($I_{эм.р}$)
АЕ2020	16	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3; 15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16	1,25 $I_{ном.р}$	12 $I_{ном.р}$
АЕ2040	63	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63		
АЕ2040М	63	0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63		
АЕ2050М	100	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100		
АЕ2060	160	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160		

Примечание. Автоматические выключатели типов АЕ2040, АЕ2040М, АЕ2050М и АЕ2060 имеют и комбинированные, и только электромагнитные расцепители.

Автоматические выключатели серии АЕ2000 при одновременной нагрузке всех полюсов с тепловыми расцепителями без температурной компенсации и температуры окружающей среды 40 °С и с температурной компенсацией и температурой окружающей среды 20 °С (холодное состояние) не срабатывают при токе 1,25 $I_{ном.р}$ не более 20 мин для выключателей с температурной компенсацией и не более 30 мин для выключателей без температурной компенсации; срабатывают при токе 7 $I_{ном.р}$ за 3...15 с с температурной компенсацией и за 1...15 с без температурной компенсации.

Однополюсные выключатели на ток 63А срабатывают при токе 1,35 $I_{ном.р}$ менее 1 ч. Уставки по току тепловых расцепителей можно регулировать в пределах 0,9...1,15 $I_{ном.р}$ для тепловых расцепителей.

Электромагнитные расцепители срабатывают за время 0,04 с при токах в 1,2 раза больших уставки.

Номинальное напряжение независимого расцепителя составляет 24; 36; 110; 127; 220; 380 В. Независимый расцепитель срабатывает при напряжении от 70 до 120 % номинального.

При формулировке заказа необходимо указать:

1) обозначение выключателя в соответствии со структурной схемой; 2) номинальное напряжение; 3) частоту; 4) номинальный ток максимальных расцепителей; 5) для выключателей с независимым расцепителем — номинальное напряжение расцепителя; 6) при необходимости поставки — тип кабельных наконечников; 7) при поставке на экспорт слово «экспорт»; 8) номер технических условий.

Например: Выключатель АЕ2026-10Н-20УЗ-А, 660 В, 50 и 60 Гц; 2,5 А, ТУ 16-522.064—82.

В таблице 1.15 даны площади поперечного сечения проводов, присоединяемых к выключателям.

1.15. Площади сечения медных и алюминиевых проводов, присоединяемых к выключателям

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Минимальная площадь сечения, мм ²	Максимальная площадь сечения, мм ²
АЕ2020	16	1,5	4,0
АЕ2040	16	1,5	4,0
АЕ2040М	63	6,0	25,0
АЕ2050М	100	10,0	60,0
АЕ2060	160	85	95

Автоматические выключатели серии ВА. В таблицах 1.16—1.18 приведены технические данные выключателей этой серии.

Автоматические выключатели ВА51-25, ВА51Г25. Они предназначены для проведения тока в нормальном режиме и отключения тока при коротких замыканиях и перегрузках в электрических цепях (ВА51-25), для пуска, остановки и защиты электродвигателей от токов перегрузки и токов короткого замыкания (ВА51Г25). На рисунке 1.64 показана структура условного обозначения автоматических выключателей ВА51.

Технические данные

- Номинальный ток максимальных расцепителей тока, А:
ВА51-25: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0.
ВА51Г25: 5,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5; 16; 20; 25.
- Номинальное напряжение главных цепей, В: при частоте 50, 60 Гц — 380, 660; при частоте 400 Гц — 380.
- Одноразовая предельная коммутационная способность, кА, при $\cos \varphi = 0,7$; при напряжении 380 В — 5,0; при напряжении 660 В — 3,0.

В таблице 1.16 приведены более подробные технические данные выключателей ВА51-25 и ВА51Г25.

1.16. Технические данные выключателей ВА51-25 и ВА51Г25

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальное напряжение главных цепей, В	Исполнение по виду максимальных распределителей тока		Число полюсов	Уставка по току срабатывания электромагнитного расцепителя (ток отсечки)	Ток срабатывания теплового расцепителя	Пределы регулирования уставки номинального тока теплового расцепителя	Степень защиты	Климатическое исполнение и категория размещения	
			Число электромагнитных расцепителей	Число тепловых расцепителей							
ВА51-25	25	660 при частоте 50 Гц, 60 Гц	3	—	3	7,10	—	—	IP00 IP20 IP54	УХЛ3 УХЛ2 Т3 Т2	
			380 при частоте 50 Гц, 60 Гц	3	3	3	7,10	1,35			0,8...1
			400 Гц	3	3	3	14	1,2			0,8...1
ВА51-25	25	То же	3	3	3	14	1,2	0,8...1			

1.17. Некоторые данные выключателей ВА16-26

Типоисполнение выключателя	Вид максимального расцепителя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальный ток теплового расцепителя, А	Номинальная уставка по току срабатывания электромагнитного расцепителя, А
ВА16-26-120010-20УХЛ4	Электромагнитный	31,5	6,3; 10,0; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5	95; 140; 225; 280; 350; 440
ВА16-26-140010-20УХЛ4	Электромагнитный и тепловой	31,5	6,3; 10,0; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5	6,3; 10,0; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5

1.18. Некоторые данные выключателей ВА51-35 и ВА52-35

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальное напряжение главной цепи, В		Номинальный ток теплового расцепителя, А	Уставки по току срабатывания максимальных расцепителей в зоне токов короткого замыкания, А		Уставки по току срабатывания электромагнитных расцепителей для исполнения выключателей без тепловых максимальных расцепителей тока, А	
		~I при 50, 60 Гц	=I		~I	=I	~I	=I
ВА51-35	250	До 660	220	80; 100; 125; 160; 200; 250	12	10; 8; 6	1000; 1250; 1600; 2000; 2500	800; 1000; 1250; 1600
ВА52-35	250	До 660	440	80; 100; 125; 160; 200; 250	12	10; 8; 6	1000; 1250; 1600; 2000; 2500	800; 1000; 1250; 1600

Автоматические выключатели серии ВА16 на номинальный ток 31,5 А. Их используют в осветительных сетях с номинальным напряжением 380 В переменного тока частоты 50 и 60 Гц (см. табл. 1.17) при включении выключателей до 30 раз в сутки вручную. Выпускают выключатели стационарного исполнения и однополюсные.



Рис. 1.64. Структура условного обозначения выключателя типа ВА-51 на номинальные токи 100 и 160 А

Предохранители. Предохранители предназначены для защиты электрических цепей от токов короткого замыкания и недопустимо длительных перегрузок.

Выбор плавких предохранителей. Предохранители выбирают из условий :

$$500 \text{ В} \geq U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{Ц}}; \quad (1.125)$$

$$I_{\text{НОМ}} > I_{\text{РАБ}}, \quad (1.126)$$

где $U_{\text{Ц}}$ — напряжение цепи, В.

При этом номинальный ток аппарата ($I_{\text{НОМ}}$) берут ближайшим по значению к рабочему току цепи.

По току плавкой вставки предохранители выбирают из условия:

$$I_{\text{НОМ.ВСТ}} = I_{\text{НОМ.ДВ}} K_i / \alpha, \quad (1.127)$$

где $I_{\text{НОМ.ДВ}}$ — номинальный ток электродвигателя, А; K_i — кратность пускового тока электродвигателя, $K_i = I_{\text{ПУСК.ДВ}} / I_{\text{НОМ.ДВ}}$; α — коэффициент, зависящий от длительности и частоты пуска: $\alpha = 2,5$ — при редких пусках с продолжительностью до 2,5 с; $\alpha = 2,5 \dots 2,0$ — при нечастых пусках длительностью от 2,5 до 10 с; $\alpha = 1,6 \dots 2,0$ — при частых пусках длительностью более 10 с.

Для электродвигателей ответственных механизмов в целях особо надежной отстройки предохранителей от бросков тока допускается принимать α , равным 2,6, независимо от условий пуска электродвигателя. Во всех случаях номинальный ток плавкой вставки должен быть равен или больше расчетного тока цепи. Найденное значение номинального тока плавкой вставки округляют до ближайшего большего значения.

Для защиты цепи с несколькими электродвигателями номинальный ток плавкой вставки выбирают из условия:

$$I_{\text{НОМ.ВСТ}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{НОМ.ДЛ}} + I'_{\text{НОМ.ДВ}} K'_1}{\alpha}, \quad (1.128)$$

где $\sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{НОМ.ДВ}}$ — сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей (без учета тока двигателя с наибольшим пусковым током); K'_1 — кратность пускового тока этого двигателя; α — коэффициент, характеризующий условия пуска этого двигателя.

Плавкие предохранители типа ПР-2 и ПН-2. Плавкие предохранители предназначены для защиты электроустановок от токов короткого замыкания и токов недопустимо длительных перегрузок.

В конфигурации плавкой вставки имеются узкие перешейки, в которых сопротивление протекающему току выше, чем в остальной части плавкой вставки. Благодаря этому узкие перешейки перегорают быстрее при длительных токах, превышающих номинальный. Промышленность выпускает предохранители типа ПР-2 на номинальное напряжение 220 В (короткий патрон) и на 500 В (длинный патрон). Предохранители типа ПР-2 с закрытыми разборными патронами без наполнителя, выпускаемые на номинальный ток 15...1000 А, нормально работают при температуре окружающей среды $-20... 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительной влажности до 70 %, в химически неактивной среде.

1.19. Некоторые данные предохранителя типа ПР-2

Ток предохранителя, А	Ток плавких вставок, А
15	6; 10; 15
60	15; 20; 25; 35; 45; 60
100	60; 80; 100
200	100; 125; 100; 200
350	200; 225; 260; 300; 300
600	350; 430; 500; 600
1000	600; 700; 800; 1000

Предохранители серии ПН-2 (рис. 1.65) с закрытым патроном с наполнителем при номинальном токе 100...1000 А предназначены

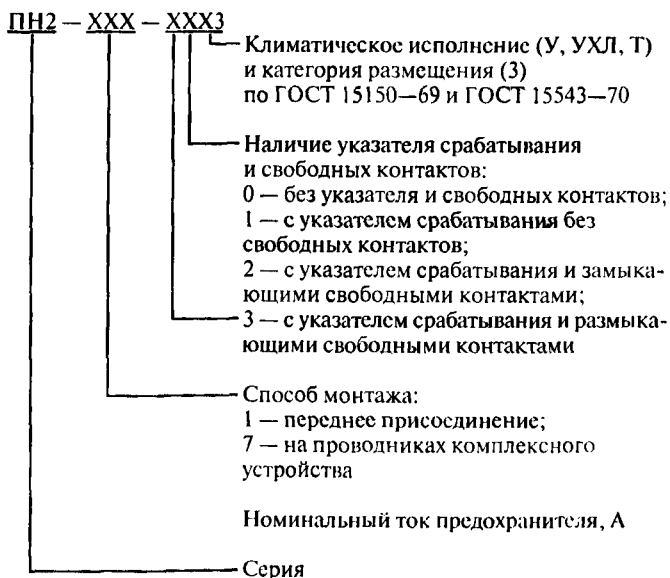


Рис. 1.65. Структура условного обозначения предохранителей типа ПН-2

для использования в электроустановках с напряжением до 500 В переменного тока частотой 50 Гц. Плавкая вставка у этого предохранителя изготовлена из нескольких полосок медной фольги и помещена в патрон, заполненный кварцевым песком, который способствует более быстрому гашению электрической дуги, возникающей при перегорании плавкой вставки.

При заказе предохранителей необходимо указывать напряжение, номинальный ток предохранителя и номинальный ток плавкой вставки (табл. 1.19). Например, предохранитель ПР-2 на 220 В, 60 А, ток плавкой вставки 20 А.

Устройство защитного отключения (УЗО). Оно предназначено для защиты людей от поражения при контакте с токопроводящими частями электроустановок и для предотвращения возгораний, пожаров, возникающих вследствие длительного протекания токов утечки и развивающихся из них токов короткого замыкания.

УЗО применяют для комплектации вводно-распределительных устройств (ВРУ), вводных и распределительных щитов, устанавливаемых в общественных зданиях — детских дошкольных учреждениях, школах, профессионально-технических, средних, специальных и высших учебных заведениях, гостиницах, санаториях, мотелях, библиотеках, крытых спортивных и физкультурно-оздоровительных учреждениях, бассейнах, саунах, театрах, клубах, кинотеатрах, магазинах, предприятиях общественного питания, предприятиях бытового обслуживания, торговых павильонах, киосках и т. п., жилых зданиях — индивидуальных и многоквартирных жилых домах, дачах, садовых домиках, общежитиях, бытовых помещениях и т. п., в административных зданиях, производственных помещениях — цехах, мастерских, АЗС автомойках, ангарах, гаражах, складских помещениях и т. п. К объектам, подлежащим оснащению УЗО, относят: вновь строящиеся, реконструируемые, капитально ремонтируемые жилые дома, общественные здания, промышленные сооружения и хозяйстройки, независимо от форм собственности и ведомственной принадлежности.

При сертификации электроустановок зданий проверяют способность каждого элемента электроустановки обеспечивать в течение срока эксплуатации безопасность для жизни и здоровья людей и их имущества при пользовании электроэнергией и удовлетворительную работу электроустановки при условии использования ее по назначению.

Функционально УЗО можно определить как быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на дифференциальный ток в проводниках, подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке.

Структуру УЗО формируют из следующих основных функциональных блоков: (рис.1.66): датчика дифференциального тока 1; блока управления 2 с пороговым элементом; исполнительного механизма 3; цепи тестирования 4.

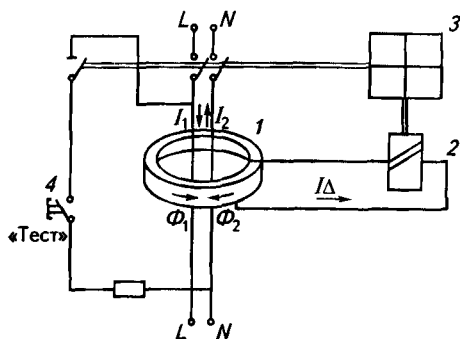


Рис. 1.66. Структура устройства защитного отключения УЗО:

1 — датчик дифференциального тока; 2 — блок управления с пороговым элементом; 3 — исполнительный механизм; 4 — цепь тестирования

В абсолютном большинстве УЗО, применяемых в настоящее время, в качестве датчика дифференциального тока используют трансформатор тока (называемый иногда, применительно к трехфазным цепям, «трансформатором тока нулевой последовательности» — ТТНП). Пороговый элемент выполняют, как правило, на чувствительных магнитоэлектрических реле или электронных компонентах.

Исполнительный механизм включает в себя сильноточную контактную группу с механизмом привода.

В нормальном режиме, при протекании рабочего тока нагрузки и при отсутствии дифференциального (разностного) тока — тока утечки (I_{Δ}) — токи в прямом и обратном проводниках, образующих встречно включенные первичные обмотки дифференциального трансформатора тока I , равны по модулю ($I_1 = I_2$) и наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные, но векторно-встречно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , в результате чего ток во вторичной обмотке равен нулю и не вызывает срабатывания порогового элемента блока управления 2.

При возникновении дифференциального тока, например тока утечки на землю или прикосновения человека к токоведущим частям, баланс токов, а следовательно, и магнитных потоков нарушается и во вторичной обмотке появляется трансформированный дифференциальный ток (ток небаланса), который вызывает срабатывание порогового элемента, воздействующего на исполнительный механизм 3. Исполнительный механизм воздействует на привод контактной группы, и защищаемая цепь обесточивается.

Цепь тестирования, искусственно создающая дифференциальный ток, предназначена для осуществления периодического контроля исправности устройства в целом путем нажатия кнопки «Тест».

Устройства защитного отключения по способу технической реализации подразделяют:

на функционально не зависящие от напряжения питания (электромеханические). Источник энергии, необходимой для выполнения операции отключения, — это сам сигнал: ток утечки, на который реагирует УЗО;

функционально зависящие от напряжения питания (электронные). Для выполнения операции отключения необходима энергия контролируемой сети или внешнего источника питания.

Для жилых, общественных и других зданий применяют УЗО, не требующие источника питания (электромеханические). Применение электронных устройств, для работы которых необходим источник питания, допускается только в качестве дополнительных (дублирующих) к основному.

В европейских странах — Германии, Австрии, Франции — электротехнические нормы допускают применение УЗО только первой категории, не зависящих от напряжения питания. УЗО второй категории разрешено применять только в качестве дополнительной защиты к устройствам первой категории для конечных потребителей, например для электроинструмента, передвижных электроприемников и т. п.

Не допускается применение УЗО в электроустановках, внезапное отключение которых может привести по технологическим причинам к возникновению ситуаций, опасных для пользователей и обслуживающего персонала, к отключению пожарной, охранной сигнализации и т. п.

В особо опасных помещениях для ответственных и конечных потребителей дополнительно применяют УЗО, встроенные в розеточные блоки. Для переносных электроприборов и электроинструмента рекомендуется использовать УЗО-розетки и УЗО-вилки, входящие в комплект электроприборов, или УЗО в виде шнура-удлинителя.

УЗО, применяемые в электроустановках зданий на объектах Российской Федерации, должны отвечать требованиям действующего стандарта (ГОСТ Р 50807—95) и в обязательном порядке пройти сертификационные испытания по утвержденной Главгосэнергонадзором и Главгосстандартом программе в специализированном на УЗО сертификационном центре с выдачей российского сертификата соответствия и его регламентированным ежегодным инспекционным контролем.

1.7.4. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА

К релейно-контактной аппаратуре относят контакторы постоянного и переменного тока, реле времени, напряжения, тока, командные аппараты и путевые выключатели.

Контакторы — аппарат, предназначенный для частых включений в силовой цепи (до 1500 раз в час) и приводимый в действие с помощью электромагнита.

Контакторы классифицируют по току (переменный или постоянный), по числу полюсов (одно-, двух-, трехполюсные), по исполнению контактов (с замыкающими или размыкающими).

Реле — устройство, включающее или отключающее электричес-

кие цепи управления под действием электрических, тепловых, механических или других импульсов.

Реле времени предназначено для передачи сигнала с некоторой выдержкой времени. В сельском хозяйстве реле времени используют для осуществления необходимой выдержки времени перед включением электропривода механизма, для предупредительной сигнализации, для обеспечения необходимой длительности технологического процесса, для остановки поточных линий с выдержкой времени с целью освобождения машин от продукта и для других целей.

Реле времени бывают постоянного и переменного тока, пневматические (РВП). При выборе реле времени учитывают пределы выдержек по времени, количество программ.

Электромагнитное реле времени состоит из электромагнитной системы, регулируемого механизма замедления срабатывания и контактной системы. При подаче напряжения на реле подвижный сердечник притягивается и заводит пружину часового механизма. Под действием пружины часовой механизм пускается в ход. По истечении установленной выдержки времени подвижный контактный мостик замыкает неподвижные контакты.

Электромеханическое реле времени состоит из электродвигателя небольшой мощности (обычно синхронного), электромагнита, сцепления, понижающего редуктора и программного устройства в виде набора дисков с упорами, контактной системы, состоящей из контактов с выдержкой времени и контактов мгновенного действия. Их применяют для получения большой выдержки времени (до 30 ч — табл. 1.20).

1.20. Технические данные реле времени на ток 5 А

Тип реле	Напряжение, В	Пределы выдержки времени	Число программ
<i>Электромеханические</i>			
РВ-4-1	127, 220, 380, 500	2...60 с	2
РВ-4-2		10...250 с	
РВ-4-3		0,5...15 мин	
РВ-4-4		2...60 мин	
РВ-4-5		10...240 мин	
РВ-4-6		0,5...30 ч	
<i>Электрическое программное моторное</i>			
2РВМ (ток 15 А)	220	15 мин...24 ч	2
<i>Полупроводниковые</i>			
ВЛ-15	127...230	1...180 с	1—2
ВЛ-16			

Моторное реле времени может иметь до шести независимых программ. Электромеханическое двухпрограммное реле времени моторного типа 2РВМ состоит из анкерного часового механизма с автоматическим подзаводом от синхронного электродвигателя, программного диска со штифтами и микровыключателей. Программы управления устанавливают на диске путем ввинчивания штифтов в отверстия двух часовых шкал. При вращении диска от часового механизма длинные штифты замыкают контакты микровыключателей, короткие — размыкают. По мере раскручивания пружины часового механизма освобождается толкатель микропереключателя, включающего электродвигатель подзавода.

Технические данные реле времени приведены в таблице 1.20.

Реле напряжения применяют в схемах автоматического управления для управления торможением, ускорением двигателей, для нулевой защиты. У реле напряжения уставку (напряжение срабатывания) регулируют в определенных пределах. Катушка реле напряжения имеет большое количество витков из проволоки малого сечения.

Промежуточные реле используют для размножения контактов, блокировок и других вспомогательных целей. У промежуточных реле напряжение срабатывания не регулируется.

Реле тока выполняют функции максимального, минимального и реле обратного тока. Катушка токового реле выполнена проводом большого сечения с небольшим количеством витков.

Командные аппараты — аппараты, на которые непосредственно воздействует оператор при управлении электроприводом. К ним относят командоконтроллеры, универсальные переключатели и кнопочные станции.

Командоконтроллеры — небольшие кулачковые контроллеры с контактами, не имеющие систему дугогашения и рассчитанные лишь на небольшие токи цепей управления. Их используют для управления двигателями, работающими в повторно-кратковременном режиме.

Универсальный переключатель (УП) — облегченный командоконтроллер, применяемый для работы в цепях управления с небольшой частотой операций (не более 160 вкл/ч).

Кнопочные станции (кнопки управления) — один или несколько кнопочных элементов, заключенных в общий кожух. Кнопочные станции применяют для управления сравнительно редко включаемыми электроприводами.

Путевые выключатели — аппараты, на контакты которых воздействуют сами механизмы при их движении. Различают вращающиеся, рычажные, кнопочные путевые выключатели с механическим воздействием на контакты. Кроме того, существуют индуктивные датчики и фотореле, не требующие механического воздействия.

1.7.5. БЕСКОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Бесконтактную аппаратуру управления и защиты, а также полупроводниковые силовые преобразователи электроэнергии, выпрямители, инверторы, преобразователи частоты, регуляторы напряжения переменного и постоянного тока широко применяют в электроустановках.

Бесконтактная аппаратура имеет свои особенности: высокую чувствительность к перегрузкам по току и напряжению, низкую помехозащищенность и плохую электромагнитную совместимость с питающей сетью. Поэтому для эксплуатации этой аппаратуры требуется соответствующей квалификации обслуживающий персонал.

В бесконтактных устройствах для коммутации тока в силовых цепях электропривода используют полупроводниковые элементы — тиристоры, транзисторы.

Тиристор — управляемый вентиль, который открывается, когда на его управляющий электрод подан небольшой положительный потенциал (4...5 В) по отношению к катоду. После этого тиристор пропускает ток даже в том случае, если управляющего напряжения нет. Но в цепи переменного напряжения при переходе анодного тока через нуль тиристор закрывается, если в этот момент отсутствует управляющий ток.

Тиристор пропускает ток только в одном направлении, поэтому в цепях переменного тока тиристоры включают встречно-параллельно: один тиристор пропускает одну полуволну тока, второй — встречную полуволну. Тиристоры выпускают на токи от 50 мА до 1000 А и напряжение до 1000 В.

На токи до 100 А изготавливают симметричные тиристоры (симисторы), пропускающие ток в обоих направлениях при подаче управляющего напряжения. На базе тиристоров выпускают пускатели, регуляторы напряжения.

Тиристорные пускатели обладают следующими преимуществами перед электромагнитными: отсутствием искрообразования, высокой механической прочностью и стойкостью к воздействию вибраций, продолжительным сроком службы, малой мощностью управления, бесшумной работой. Их применяют там, где можно использовать в полной мере их положительные качества: при большой частоте включений, в пожароопасных помещениях, передвижных машинах и т. п.

Транзисторы IGBT — это гибрид транзисторов с изолированным затвором и биполярных транзисторов. Их применяют в преобразователях частоты, используемых для регулирования угловой скорости электроприводов (рис. 1.67).

Бесконтактные способы регулирования электроприводов. В основном схемотехнических решений силовой части преобразователей для регулируемых электроприводов положены два способа — фазовое управление и широтно-импульсная модуляция.



Рис. 1.67. К сравнению свойств полностью управляемых ключей:

MOSFET — низкое входное напряжение (менее 200 В); высокая частота (до 500 кГц); контролируемое движение затвора — легко управляем; биполярный транзистор — высокое входное напряжение, малые токи; малые потери при включении; высокая частота (до 100 кГц) при малых токах; сложное управление; IGBT — высокое напряжение, большие токи; потери при включении много меньше, чем у MOSFET; средняя частота (до 20 кГц); контролируемое напряжение затвора — легко управляем

При *фазовом управлении* используют не полностью управляемые бесконтактные ключи (тиристоры). Этот способ применяют для питания двигателей постоянного тока от сети переменного тока — система ТП—Д (тиристорный преобразователь — двигатель), для регулирования напряжения асинхронных электродвигателей — система ТРН—АД (тиристорный регулятор напряжения — асинхронный электродвигатель), а также в простейших однофазных схемах регулирования в бытовой технике. Возможности фазового управления ограничены тем, что напряжение на нагрузке формируется из участков синусоидального напряжения питания. Управление начинается с момента включения, а отключение происходит либо в момент естественного снижения тока до нуля, либо за счет принудительного приложения к ключу обратного напряжения при включении ключа другой фазы источника питания. Это не позволяет плавно регулировать частоту напряжения на нагрузке и получать частоту выше частоты питающей сети, а также вызывает искажение формы токов и напряжений.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) постоянного напряжения питания свободна от указанного недостатка, но для ее осуществления требуются полностью управляемые ключи. Частотные свойства ШИМ ограничены только конечным временем включения и отключения полупроводникового ключа. При достаточно высокой частоте коммутации индуктивности обмоток электрической машины представляют собой естественные низкочастотные фильтры, что обеспечивает возможность более качественного формирования требуемых токов и напряжений.

Недостаток ШИМ-регулирования — увеличение дополнительных потерь в полупроводниковом ключе при увеличении несущей частоты ШИМ.

Технические характеристики отечественных тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) общего назначения. Тиристорные комплекты устройств серии ТСУ-4 предназначены для управления трехфазными асинхронными двигателями и другими активно-индуктивными нагрузками переменного тока. Технические данные этих устройств: напряжение сети 380 В при частоте 50 Гц; номинальный ток 25, 63, 160, 400 А; диапазон регулирования напряже-

ния 0,1...0,95; максимально допустимая частота включений в час 2000.

Регуляторы напряжения (бесконтактные пускатели) типа ПБ предназначены для питания и регулирования напряжения на однофазных, двухфазных, трехфазных, активных и активно-индуктивных нагрузках и могут быть использованы в системах регулирования напряжения, тока, температуры, мощности и т. д.

Номинальное выходное напряжение 220, 380, 440 В; пределы регулирования напряжения 5...98 %; номинальный выходной ток 10...630 А; КПД — 0,95...0,98.

Преобразователи напряжения типа ПН ТТ (ОАО «Инвертор», г. Оренбург) — аналог регуляторов напряжения РНТТ. Они предназначены для фазового регулирования напряжения на активных и активно-индуктивных нагрузках, в частности печей сопротивления. Технические данные этих преобразователей приведены в таблице 1.21.

1.21. Преобразователи напряжения типа ПН

Наименование	Мощность, кВА	Ток, А	Масса, кг
ПН-ТТЕ-63-340-50	37	63	67
ПН-ТТЕ-160-340-50	94	160	72
ПН-ТТВ-250-340-50	147	250	70
ПН-ТТВ-630-340-50	371	630	70

Напряжение питания трехфазное 380 В частотой 50 (60) Гц.

Отечественные ТРН средней мощности имеют следующие характеристики: масса 4...1 кг/кВт; объем 3...1 дм³/кВт; стоимость 900...300 руб/кВт.

Статические и гибридные коммутационные аппараты на основе ТРН. Силовые электрические аппараты на основе ТРН используются в электроустановках различного назначения в качестве бесконтактных контакторов, переключателей нагрузки и выключателей. Силовая часть схем этих аппаратов выполнена аналогично ТРН, а основное отличие — два состояния тиристоры: полностью открытое или полностью закрытое.

Развитие бесконтактных аппаратов привело к появлению так называемых *гибридных аппаратов*, в которых соединены ТРН и электромагнитный контактор. В таком гибридном аппарате тиристорная часть работает в периоды коммутации тока нагрузки. После окончания коммутационных периодов включается электромагнитный контактор, который своими силовыми контактами шунтирует тиристоры и подключает нагрузку напрямую к питающей сети.

Отечественная промышленность выпускает несколько типов статических и гибридных аппаратов. Бесконтактные полупроводниковые контакторы (прерыватели) с естественной коммутацией типа ТКЕО-250/380 выпускают на номинальное напряжение 380 В

и номинальный ток 250 А для коммутаций линий нагрузки и типа ТКЕП-100/380 на ток 100 А для переключения нагрузки.

Технические характеристики гибридных контакторов приведены в таблице 1.22.

1.22. Гибридные контакторы переменного тока

Тип контактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Частота включения в час, не более	Износостойкость, млн. циклов		Размеры, мм			Масса, кг	Ток КЗ, кА	Время отключения, мс
				механическая	коммутационная	ширина	высота	глубина			
КТ64-33	380	160	1200	10	5	380	275	330	17,9	8	12
КТ65-33	660					380	280	345	19,4	9	
КТ64-35	380	250	1200	10	5	480	295	395	36	13	12
КТ65-35	660										
КТ64-37	380	400	600	5	5	580	330	445	72	9	20
КТ65-37	660										
КТ64-39	380	630	600	5	5	580	407	460	94	20	20
КТ65-39	660										
КТП64-33	380	160	2000	16	5	380	275	330	21,6	8	12
КТП65-33	660					380	280	345	23,0	9	
КТП64-35	380	250	2000	10	5	480	295	395	41,5	13	12
КТП64-35	660										
КТП64-37	380	400	1200	10	5	580	330	445	72	19	20
КТП65-37	660										
КТП64-39	380	630	1200	10	5	580	407	460	102	20	20
КТП65-39	660										

Бесконтактные пускатели для двигателей переменного тока. При пуске двигателей переменного тока, мощность которых соизмерима с мощностью питающей сети, из-за больших пусковых токов имеет место существенное снижение напряжения этой сети, что оказывает неблагоприятное воздействие на сеть, сам электропривод и другие приемники электроэнергии. Эффективное средство снижения пусковых токов — применение бесконтактных пускателей («мягких» стартеров), которые могут реализовать и другие перечисленные выше функции по управлению и защите двигателей.

Пускатель размещают между источником питания и статором двигателя. В этом случае имеет место эффект ограничения тока и момента асинхронного двигателя при регулировании величины питающего напряжения.

При необходимости изменять направление угловой скорости (реверса) АД используют реверсивные пускатели. Силовую часть реверсивного пускателя выполняют на пяти парах встречно-параллельно включенных тиристоров. Если сигналы управления подать на тиристорные пары 1, 3 и 5, то на статор двигателя поступит питающее напряжение с последовательностью фаз сети и двигатель будет вращаться в одном направлении. Если же сигналы

управления подать на тиристорные пары 2, 4 и 5, а с тиристорных пар 1 и 3 их снять, то направление вращения ротора двигателя изменится на обратное.

Для осветительных приборов разработаны следующие выключатели, регуляторы светового потока и стабилизаторы напряжения.

Устройство трехфазное типа ППТТ (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск) используют в системах электроосвещения с лампами накаливания, разрядными лампами высокого давления типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ, ДКсТ и люминесцентными лампами. Оно предназначено для поддержания напряжения питания осветительных приборов, их автоматического включения и выключения, а также регулирования освещенности объектов. Номинальное напряжение питающей сети 220 В, номинальные токи нагрузки 63; 100 и 160 А.

Стабилизатор-ограничитель напряжения типа ТОН-3 служит для поддержания напряжения в осветительных сетях с лампами накаливания, люминесцентными лампами, лампами типа ДРЛ, ДРИ и КИ-220 при повышении напряжения до 30 % относительно номинального и может быть использован как бесконтактный выключатель осветительной нагрузки. Его номинальный ток 63 и 100 А и номинальное напряжение 380/220 В, срок службы 10 лет, ресурс 10 000 ч.

Выбор бесконтактной коммутационной аппаратуры. ТРН выбирают по следующим показателям: уровню и частоте напряжения питающей сети; току нагрузки; числу фаз нагрузки; характеру нагрузки (активная, активно-индуктивная, емкостная); диапазону регулирования выходного напряжения ТРН; наличию необходимых защит и сигнализации; наличию средств диагностики; режиму работы ТРН (51, 52, 53); климатическому исполнению и категории размещения; степени защиты IP; требованиям техники безопасности; высоте над уровнем моря; условиям эксплуатации.

Пускатели выбирают для двигателей по тем же показателям, что и ТРН. Дополнительно следует учитывать:

реверсивный или нереверсивный характер работы двигателя;
способ ограничения пускового тока (целесообразный характер изменения напряжения при пуске, определяемый видом механической нагрузки двигателя);

необходимость электрического торможения двигателя;

способ подачи сигнала управления на пускатель — электромеханический контакт (кнопка, ключ управления) или потенциальный сигнал управления (напряжения или тока);

износостойкость пускателя;

допустимая частота включений.

Контрольные вопросы и задания

1. Каково назначение пускозащитной аппаратуры? 2. Объясните методики выбора автоматического выключателя, предохранителя, магнитного пускателя.
3. Расскажите о назначении устройства защитного отключения.

1.8. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ РАЗОМКНУТЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

1.8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Управление электроприводом при пуске, торможении, при изменении направления вращения вала ЭП может быть ручное и автоматическое, в последнем имеет место автоматизированный электропривод.

Первыми автоматизированными устройствами управления электроприводами были релейно-контактные системы, в которых главными аппаратами были реле, командные аппараты и другие устройства, позволяющие осуществлять автоматический или дистанционный пуск двигателя, его ускорение, изменение скорости, реверс, торможение и т. д.

Системы релейно-контактного управления — это *разомкнутые* системы, характеризующиеся тем, что выходная величина привода, например частота вращения, не влияет на входную величину, например напряжение, подводимое к двигателю. В разомкнутых системах отсутствуют обратные связи. Эти схемы достаточно просты. Их широко применяют там, где не требуется высокое качество управления электроприводом, например при пуске, реверсе и торможении двигателей.

Для сложных приводов применяют *замкнутые* системы автоматического управления, в которых обязательно присутствуют обратные связи. Благодаря этому выходная величина, например скорость двигателя, воздействует на входную величину (напряжение питания) так, чтобы выходная величина сохраняла свое заданное значение.

1.8.2. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ СХЕМЫ РАЗОМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ КОРОТКОЗАМКНУТЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Управление пуском, торможением и реверсом асинхронных двигателей (АД) происходит в основном в функции времени, скорости (ЭДС), тока или пути.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обычно запускают прямым подключением к сети без ограничения пусковых токов. Поэтому ими обычно управляют с помощью магнитных пускателей.

Работа схемы управления пуском АД. Схема управления пуском асинхронного электродвигателя показана на рисунке 1.68.

Основной элемент схемы управления — *магнитный пускатель*, состоящий из контактора *КМ1* и теплового реле *КК1*. Эта схема обеспечивает прямой пуск АД, его отключение, защиту от перегрузок (тепловое реле *КК1*) и токов короткого замыкания (предохранители *FУ1...FУ3*).

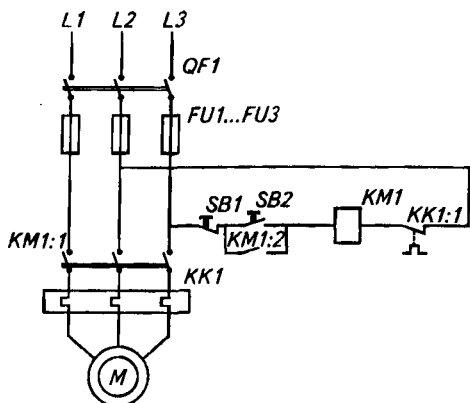


Рис. 1.68. Схема управления пуском асинхронного электродвигателя

питание и отключает АД от сети. Происходит процесс торможения АД выбегом под действием момента нагрузки на его валу.

Работа реверсивной схемы управления АД. Реверсивная схема управления асинхронного электродвигателя показана на рисунке 1.69.

Основной элемент схемы управления — *реверсивный магнитный пускатель*, состоящий из двух линейных контакторов ($KM1$ и $KM2$) и теплового реле ($KK1$). Эта схема обеспечивает прямой пуск и реверс АД, а также торможение АД противовключением при ручном (неавтоматическом) управлении. В схеме предусмотрена защита от перегрузок (тепловое реле $KK1$), от токов короткого замыкания в цепях статора автоматическим выключателем $QF1$, а также нулевая защита от исчезновения или снижения напряжения сети контакторами $KM1$ и $KM2$.

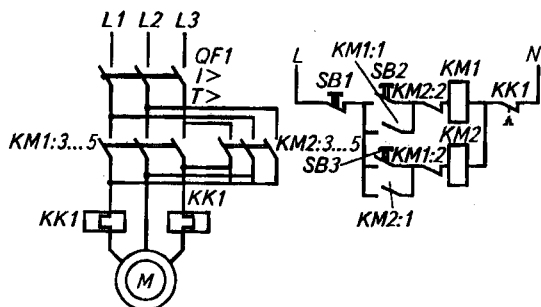


Рис. 1.69. Реверсивная схема управления асинхронного электродвигателя

При включенном автоматическом выключателе происходит запуск двигателя в условном направлении «вперед» или «назад» соответственно нажатием кнопок *SB2* и *SB3*. При этом срабатывают соответственно контакторы *KM1* или *KM2* и подключают АД к сети.

Для реверса или торможения сначала нажатием кнопки *SB1* обесточивают катушку контактора (например, *KM1*). Затем нажатием кнопки *SB3* подают напряжение на АД с другим чередованием фаз. После этого магнитное поле статора изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, который состоит из двух этапов: торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

Если необходимо только затормозить АД, то при угловой скорости, близкой к нулю, вновь нажимают кнопку *SB1*. Это приводит к отключению АД от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если же кнопку *SB1* не нажимать, то начнется разбег АД в другую сторону, т. е. реверс.

Во избежание возникновения короткого замыкания вследствие ошибочного одновременного нажатия на кнопки *SB2* и *SB3* используют типовую электрическую блокировку, заключающуюся в перекрестном включении размыкающих контактов: *KM1:2* в цепи контактора *KM2* и *KM2:2* в цепи контактора *KM1*.

Повышению надежности электропривода и удобству его эксплуатации способствует использование автоматического выключателя *QF*, который исключает возможность работы электропривода при обрыве одной фазы и при однофазном коротком замыкании, что может иметь место при использовании предохранителей.

Работа схемы управления двухскоростным АД. Схема управления двухскоростным асинхронным электродвигателем показана на рисунке 1.70.

Для пуска АД и вращения его с малой скоростью нажимают кнопку *SB4*. При этом срабатывают контактор *KM2* и блокировочное реле *KV1*. Статор двигателя включается по схеме «треугольник», а реле *KV1*, замкнув свои контакты в цепях катушек аппаратов *KM3* и *KM4*, подготавливает подключение его к источнику питания. Нажатием кнопок *SB2* или *SB3* приводят к пуску двигателя в направлении соответственно «вперед» или «назад».

Для разгона двигателя до высокой скорости нажимают кнопку *SB5*, которая отключает контактор *KM2* и включает контактор *KM1*, т. е. переключает секции обмоток статора со схемы «треугольник» на схему «двойная звезда».

Останавливают двигатель нажатием кнопки *SB1*, которая отключает все контакторы и сам двигатель от сети.

Применение в данной схеме двухцепных кнопок управления не допускает одновременного включения контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4*. Этой же цели служит перекрестное включение блок-контактов контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4* в цепи их катушек.

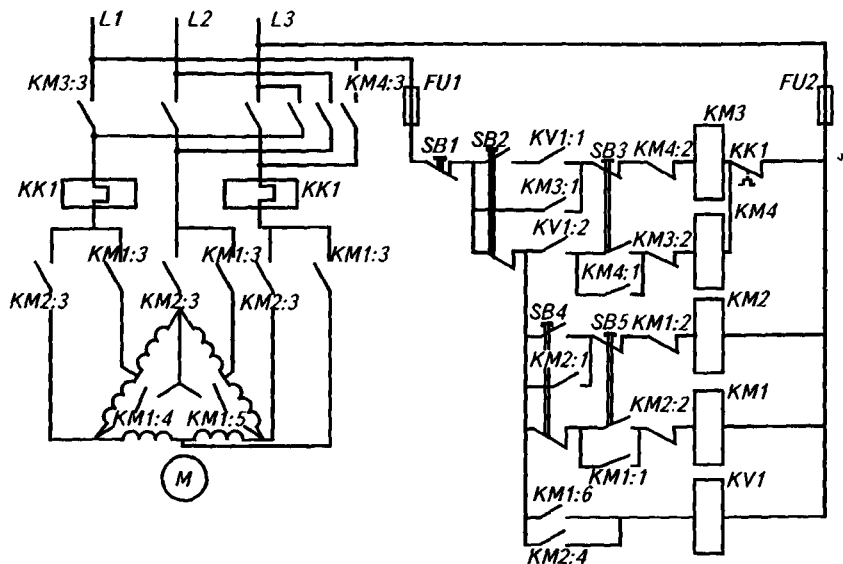


Рис. 1.70. Схема управления двухскоростным асинхронным электродвигателем

На рисунке 1.71 приведена схема управления пуском и динамическим торможением асинхронного двигателя.

Для пуска АД нажимают кнопку *SB2* («Пуск»). При этом подается питание на катушку линейного контактора *KM1*. При замыкании контактов *KM1:4...6* линейного контактора подается питание на двигатель, а при замыкании контактов *KM1:3* — на катушку реле времени *KT1*, которое замыкает свои контакты *KT1:1* в цепи контактора торможения *KM2*. Контактор торможения *KM2* не срабатывает, так как в его цепи разомкнут контакт *KM1:2*.

Для остановки АД нажимают кнопку *SB1* («Стоп»). Контактор *KM1* отключается, размыкает свои силовые контакты *KM1:4...6* в цепи статора и отключает двигатель от сети. Вместе с этим замыкается контакт *KM1:2* в цепи катушки *KM2* и размыкается контакт *KM1:3* в цепи реле *KT1*. Это приводит к включению контактора торможения *KM2*, подаче постоянного тока на обмотку статора от моста *VD* через тормозной резистор *R_T* и переводу двигателя в режим динамического торможения.

Реле времени *KT1*, потеряв питание, размыкает свой контакт *KT1:1* в цепи катушки *KM2* с выдержкой по времени, равной времени остановки двигателя. Катушка *KM2* своим контактом *KM2:2* отключает постоянный ток от обмотки статора. Схема возвращается в первоначальное состояние.

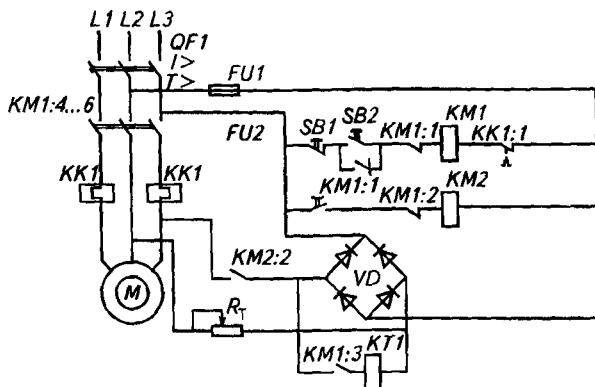


Рис. 1.71. Схема управления прямым пуском асинхронного электродвигателя и его динамическим торможением

Продолжительность динамического торможения регулируется тормозным резистором R_T , который изменяет постоянный ток в статоре.

Для исключения возможности одновременной подачи постоянного и переменного токов на обмотку статора в схеме предусматривается перекрестное включение контактов катушек $KM1$ и $KM2$.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под разомкнутыми и замкнутыми системами автоматического управления? 2. Перечислите типовые узлы схем разомкнутых систем управления электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями.
3. Поясните работу схемы управления пуском асинхронного электродвигателя.
4. Поясните работу реверсивной схемы управления асинхронного электродвигателя.
5. Поясните работу схемы управления двухскоростным асинхронным электродвигателем.

1.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ И ОБЛУЧЕНИЕ

1.9.1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

В настоящее время известны следующие воздействия энергии оптического излучения на биологические объекты.

Световое — воздействие видимого излучения на глаз человека или животного. Благодаря световому воздействию оптичес-

кого излучения человек и животное обладают способностью видеть.

Фотосинтетическое — воздействие видимого и длинноволнового ультрафиолетового излучения на растения. Благодаря этому воздействию растения в процессе фотосинтеза образуют органические вещества из неорганических.

Фотопериодическое (фотопериодизм) — воздействие на растения и животных чередований темноты и света при различном спектральном составе излучения.

Терапевтическое — эритемное, антирахитное, тонизирующее облучение людей и животных ультрафиолетовым, видимым и инфракрасным излучением, вызывающее улучшение обмена веществ, повышение жизненного тонуса, иммунитета.

Бактерицидное — воздействие ультрафиолетового, в больших дозах инфракрасного излучения, вызывающего гибель бактерий, растений и мелких животных.

Мутагенное — длительное воздействие ультрафиолетового излучения, приводящее к наследственным изменениям. Его используют для выведения высокопродуктивных растений и других организмов.

В результате поглощения энергии оптического излучения живыми клетками в них начинают протекать фотохимические реакции. Для каждого фотобиологического процесса можно построить зависимость изменения его интенсивности от длины волны оптического излучения, т. е. от спектра. При проектировании энергоэкономичных облучательных установок учитывают спектр излучения источников.

1.9.2. НАЗНАЧЕНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ И ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

На освещение и облучение в сельском хозяйстве затрачивают 10...12 % всей потребляемой электрической энергии.

Осветительные установки предназначены для обеспечения нормальной работы человека, *облучательные установки* — для выполнения требований технологического процесса. Эти установки широко используют в осенне-зимний период в теплицах для удлинения короткого светового дня. Для профилактики рахита у людей и животных служат облучательные установки со специальными ультрафиолетовыми лампами и т. д.

В спектре электромагнитных колебаний выделяют оптическую зону с длиной волны 10...340 000 нм (1 нанометр = 10^{-9} м). В эту зону входят ультрафиолетовое (10...380 нм), видимое (380...760 нм) и инфракрасное (760...340 000 нм) излучение. Видимое излучение названо так потому, что наш глаз его видит, оно состоит из семи основных цветов (табл. 1.23).

1.23. Границы участков цветов

Длина волны, нм	Цвет	Длина волны, нм	Цвет
380...450	Фиолетовый	550...585	Желтый
450...480	Синий	585...620	Оранжевый
480...510	Голубой	620...760	Красный
510...550	Зеленый		

Для характеристики источников излучения (света) используют такие понятия, как световой поток, сила света, яркость, освещенность, срок службы и т. д.

Световой поток (Φ_c) — мощность энергии излучения, оцениваемая по действию на глаз среднего человека. Единица светового потока — люмен (лм): $1 \text{ лм} = \frac{1}{680} \text{ Вт}$ для однородного излучения с длиной волны, равной 555 нм. При другой длине волны это равенство наблюдаться не будет. Световой поток карманного фонарика составляет примерно 6 лм.

Сила света (I_c) — отношение светового потока Φ_c к телесному углу (ω), в котором он распространяется. Единица силы света — кандела (кд): $1 \text{ кд} = 1 \text{ лм}/1 \text{ ср}$. Единица телесного угла — стерadian (ср). 1 ср — это телесный угол, вершина которого находится в центре сферы, а основанием служит площадь сферы, равная квадрату радиуса сферы.

Освещенность (E) — отношение светового потока Φ_c к площади, на которую он равномерно падает,

$$E = \Phi_c / S. \quad (1.129)$$

Единица освещенности — люкс (лк)

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2. \quad (1.130)$$

Световая отдача — отношение светового потока к мощности, потребляемой из сети (лм/Вт),

$$\eta_c = \Phi_c / P_{\text{потр}}. \quad (1.131)$$

Срок службы — средняя продолжительность горения ламп.

Если речь идет об использовании ламп, например для облучения животных, для облучения растений и т. д., то в этом случае целесообразнее оценивать источник излучения не световым потоком, а эффективным потоком. Считают, что *эффективный поток* пропорционален реакции приемника. Наибольшая чувствительность у зеленого листа — в синей и красной областях этого излучения.

Если речь идет об облучении растений, то эффективный поток называют *фитопотоком* ($\Phi_{\text{ф}}$). Единица фитопотока — ф и т (фт); фитооблученности — фт/м².

Если используют лампы для обеззараживания помещения (тары), то эффективный поток называют *бактерицидным*, так как под действием этого потока бактерии гибнут. Единица бактерицидного потока — б а к т (бк).

Кожа человека, а также животного подвергается действию *эритемного (витального — жизненного)* потока. Эритемный поток способствует образованию витамина D. Единица эритемного потока — в и т, или э р.

В растениеводстве наряду с фитопотоком используют *поток фотосинтетически активной радиации* ($\Phi_{\text{ФАР}}$). Этот поток не зависит от реакции приемника, а представляет собой часть полного потока излучения лампы в диапазоне 380...780 нм.

В основном все облучательные и осветительные установки состоят из источника излучения (лампы), пускорегулирующей аппаратуры, служащей для зажигания лампы и ограничения тока в ней, и отражателя, назначение которого перераспределять поток излучения лампы в нужном направлении.

Для электрического освещения применяют разрядные лампы низкого давления, например люминесцентные; лампы высокого давления, например металлогалогенные типа ДРИ (дуговые ртутные йодированные), ДРИЗ (дуговые ртутные йодированные зеркальные), натриевые типа ДНаТ (дуговые натриевые трубчатые), ртутные типа ДРЛ (дуговые ртутные лампы); лампы накаливания. Вышедшие из строя ртутные разрядные лампы хранят в специальном месте для дальнейшей их утилизации.

1.9.3. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ (ИСТОЧНИКИ СВЕТА)

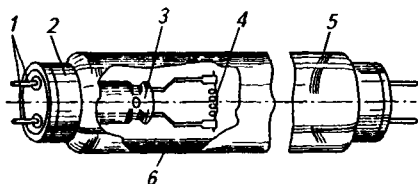
Лампы накаливания. Наиболее распространенный источник света — это лампы накаливания. В качестве нити накала используют тугоплавкий металл, например вольфрам. Ток, проходя по нити накала, разогревает ее, и она начинает излучать свет. В спектре излучения этих ламп преобладают желтые лучи. Промышленность выпускает разнообразные типы ламп накаливания на различные номинальные напряжения.

Номинальное напряжение — напряжение, на которое рассчитана лампа. При этом напряжении она потребляет из сети расчетную мощность.

Срок службы ламп накаливания — средняя продолжительность горения всех типов ламп накаливания общего назначения при заданном напряжении до выхода их из строя; составляет не менее 1000 ч; в значительной степени зависит от напряжения сети.

Рис. 1.72. Устройство разрядных ламп низкого давления:

1 — титровые токоподводы; 2 — цоколь; 3 — стеклянная ножка; 4 — электрод; 5 — колба; 6 — люминофор



Разрядные лампы низкого давления (люминесцентные лампы). На рисунке 1.72 показано устройство разрядных ламп низкого давления.

Их действие состоит в следующем. Если к электродам приложено напряжение 500...2000 В на 1 м длины трубки, то свободные электроны движутся в сторону электрода с положительным знаком. Если к электродам приложено переменное напряжение, то направление движения электронов изменяется с его частотой. На своем пути электроны встречают нейтральные атомы газа, которым заполнена трубка, ионизируют их, выбивая электрон с верхней орбиты атома в пространство или с нижней орбиты на верхнюю. Такие возбужденные атомы, вновь соударяясь с электронами, превращаются в нейтральные атомы. Это обратное превращение сопровождается излучением. Каждый инертный газ и пары металла имеют свою длину излучения. Так, гелий светится желтым цветом, неон — красным, аргон — голубым, натрий — желтым, олово — розовым. Для паров ртути характерны фиолетовое и ультрафиолетовое излучения.

Внутренняя поверхность колбы покрыта белым кристаллическим веществом — *люминофором*, который преобразовывает невидимое ультрафиолетовое излучение паров ртути в видимое. Трубки люминесцентных ламп выполнены из обычного стекла, не пропускающего коротковолновое ультрафиолетовое излучение. Трубка заполнена смесью аргона и паров ртути. Аргон облегчает зажигание разряда и способствует уменьшению распыления покрытий электродов. При разряде возбуждаются и излучают только атомы ртути.

Основные преимущества люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания — высокая светоотдача (например, у лампы накаливания марки Б 230...240-40 световой поток равен 705 лм, а светоотдача — $705/40 \approx 17,63$ лм/Вт; у люминесцентной лампы ЛБ-40 световой поток составляет 3200 лм, а светоотдача — $3200/40 \approx 80$ лм/Вт); более благоприятный спектр излучения; невысокая температура колбы; высокий срок службы (более 7000 ч).

Недостатки люминесцентных ламп — большие габаритные размеры; чувствительность к температуре окружающей среды (стабильно работают при температуре 5...25 °С, при температуре 5 °С и ниже надежное зажигание ламп не гарантировано); пульсация светового потока, которая может привести к стробо-

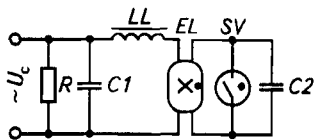


Рис. 1.73. Схема включения люминесцентных ламп

скопическому эффекту; необходимость в пускорегулирующих устройствах (ПРА) для зажигания этих ламп и ограничения тока в них, хотя ПРА усложняют и удорожают схему включения ламп. Напряжение у осветительных приборов должно быть не менее 90 % номинального.

Принципиальная электрическая схема включения люминесцентной лампы низкого давления (EL) приведена на рисунке 1.73.

Рассмотрим назначение элементов схемы.

Стартер (SV) — неоновая лампа тлеющего разряда. В ней один из электродов — биметаллическая пластинка, которая может замыкать и размыкать цепь электродов лампы. Поэтому стартер служит для автоматического замыкания на некоторое время цепи электродов лампы и для мгновенного разрыва этой цепи после разогрева электродов.

Дроссель (LL) — индуктивное сопротивление, которое служит для ограничения тока лампы, для создания импульса повышенного напряжения для зажигания лампы.

Конденсатор (C2), подсоединенный параллельно стартеру, служит для снижения радиопомех, предотвращения возникновения дуги между контактами стартера в момент их размыкания, увеличения импульса зажигания лампы.

Конденсатор (C1), подключенный параллельно сети, служит для повышения коэффициента мощности схемы с 0,5...0,6 до 0,9.

Сопротивление (R) служит для разряда конденсаторов C1 и C2 после отключения лампы от сети.

Стробоскопический эффект проявляется в том, что движущиеся предметы, например вращающиеся детали, могут зрительно казаться неподвижными, при этом создается опасность травматизма. Стробоскопический эффект может возникнуть из-за пульсации светового потока люминесцентных ламп. Для избежания стробоскопического эффекта люминесцентные лампы включают на различные фазы сети.

Люминесцентные лампы постоянно совершенствуют и для них разрабатывают электронные ПРА.

Компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Использование КЛЛ позволяет повысить энергосбережение осветительных установок. Преимущества КЛЛ — высокая световая отдача; большой срок службы (15 тыс. ч); высокое качество цветопередачи; возможность произвольного рабочего положения; незначительная масса; мгновенный запуск без мерцания и немигающее горение; устойчивая работа в диапазоне температур $-30...50$ °С; возможность работы в режиме аварийного питания от 230 В постоянного напряжения. Лампы выпускают с цоколем E14

(как у ламп накаливания). Общий вид ламп представлен на рисунке 1.74.

Разрядные лампы высокого давления. К лампам этого типа относят дуговые ртутные лампы (ДРЛ), натриевые лампы (ДНаТ), металлогалогенные (ДРИ), лампы REFLUX и др. Все эти лампы — высокоинтенсивные источники света.

Лампы типа ДРЛ (рис. 1.75) мощностью от 80 до 1000 Вт. Визуально излучение этих ламп синеватое. В основном они предназначены для освещения улиц, складских помещений, т. е. там, где не требуется высокое качество цвето-передачи, так как в их излучении недостаточное количество оранжево-красной части спектра. Частично этот недостаток исправляют, покрывая колбу лампы люминофором.

При подаче напряжения на лампу между близкорасположенными электродами, основным и вспомогательным, возникает разряд, который ионизирует газ в горелке. После этого возникает разряд между основными электродами горелки, а между основными и вспомогательными прекращается. Так как горелка изготовлена из кварцевого стекла и заполнена аргоном и дозированной количеством ртути, то она пропускает невидимое ультрафиолетовое излучение ртути. Это излучение поглощается люминофором и преобразуется им в видимое излучение. Дроссель (рис. 1.76) служит для ограничения тока лампы и установления его в допустимых пределах при изменении напряжения питания лампы. В момент зажигания ток лампы превышает номинальный в 2...2,5 раза. Длительность разгорания лампы составляет 5...10 мин, температура колбы может превышать 200 °С. Повторное зажигание лампы возможно только после некоторого ее остывания, т. е. через 10...15 мин после ее погасания.

Благодаря высокой температуре колбы температура окружающего воздуха не оказывает существенного влияния на надежность зажигания ламп, и их можно эксплуатировать при -40...80 °С.

Рис. 1.75. Устройство ламп типа ДРЛ:

1 — внешняя стеклянная колба; 2 — слой люминофора; 3 — разрядная трубка из кварцевого стекла; 4 — рабочий электрод; 5 — зажигающий электрод; 6 — ограничительные резисторы *РК* в цепи поджигающих электродов

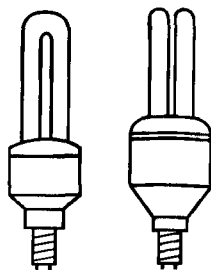
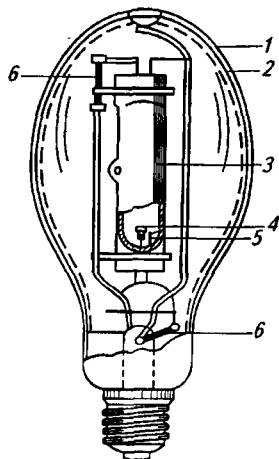


Рис. 1.74. Общий вид КЛЛ



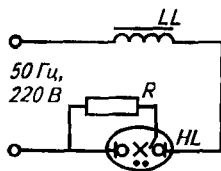


Рис. 1.76. Схема включения ламп ДРЛ

На базе ламп ДРЛ выпускают лампы для теплиц типа ДРЛФ 400 (дуговая ртутная фитолампа) мощностью 400 Вт. Устройство этих ламп аналогично устройству ламп ДРЛ, но кварцевая горелка мощностью 400 Вт размещена в колбе от лампы в 700 Вт, причем люминофором колба покрыта только сверху (для перераспределения потока излучения вниз). Эти лампы входят в облучатель тепличный типа ОТ 400. Некоторые данные источников излучения, применяемых в растениеводстве защищенного грунта, приведены в таблице 1.24.

1.24. Технические данные некоторых ламп, используемых в растениеводстве защищенного грунта

Тип лампы	Мощность лампы, Вт	Световой поток, клм	Фитопоток, фг	Поток в области ФАР, Вт	Средний срок службы, тыс. ч	Тип облучателя	Напряжение на лампе, U_n , В	Напряжение сети, U_c , В	Ток лампы, I_n , А
ДРЛФ 400	400	16	18	30,2	7	ОТ-400	135	220	3,25
ДНаТ 400	400	47	51	120	12	ЖСП-49-400	100	220	4,5
ДРИ 400-5	400	35	60	114,5	10	ГСП-26-400	130	380	3,3
REFLUX 350	350	34	39,1	92	12	ОТ-400	100	220	3,25
REFLUX 400	400	46	51	120	20	ОТ-400	100	220	4,6

Лампы типа ДНаТ натриевые лампы. Визуально излучение этих ламп желтое. Поэтому их используют для освещения улиц, а также там, где не требуется высокое качество цветопередачи. Эти лампы обладают более высокой светоотдачей и фитоотдачей по сравнению с лампами ДРЛФ. Поэтому их целесообразно использовать для освещения улиц и в растениеводстве защищенного грунта.

Схема включения ламп типа ДНаТ приведена на рисунке 1.77. Лампа ДНаТ содержит керамическую горелку, которая выдерживает нагрев до более высокой температуры, чем кварцевые горелки у ламп типа ДРЛ.

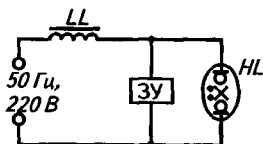


Рис. 1.77. Схема включения ламп типа ДНаТ

Для работы лампы необходим дроссель. Для зажигания ламп типа ДНаТ необходимо повышенное напряжение (порядка 1...2 кВ), поэтому в схеме используют зажигающее устройство (ЗУ). После зажигания лампы ЗУ прекращает свою работу.

Натриевые лампы обладают следующими преимуществами перед лампами типа

ДРЛ: не содержат паров ртути и, следовательно, экологически чистые; высокий срок службы; спектр излучения этих ламп резко снижает проблемы движения транспорта в условиях ухудшения видимости: туман, дождь; высокий световой поток.

Недостатки ламп ДНАТ — усложнение схемы включения, так как необходимо использовать зажигающее устройство; высокая стоимость.

Лампы типа ДРИ — дуговые ртутные йодированные (металлогалогенные лампы). Визуально излучение этих ламп зависит от того, йодиды каких металлов находятся в кварцевой горелке. Лампы первой модификации имеют наполнение In, Dy, Ho, Tu, Na, T; их излучение визуально белое. Лампы второй модификации содержат йодиды металлов Tl, Na, In; у них излучение зеленоватое. Лампы пятой модификации содержат Na, Sc; их излучение желтоватое. Наиболее приятным для глаза спектром излучения обладают лампы типа ДРИ 400-5 (пятой модификации). Кроме того, эти лампы имеют существенный фитопоток. Устройство ламп типа ДРИ 400-5 аналогично устройству ламп ДРЛ с тем отличием, что внешняя колба не покрыта люминофором, а на концах кварцевой горелки нанесены «тепловые рубашки», предназначенные для поддержания высокой температуры колбы лампы, достаточной для того, чтобы йодиды металлов испускали требуемый спектр излучения. Для зажигания ламп типа ДРИ также требуется зажигающее устройство.

Лампы типа REFLUX. Эти лампы выполнены на базе натриевых ламп. При эксплуатации их располагают горизонтально. Лампы типа REFLUX 350 мощностью 350 Вт используют для прямой замены ламп ДРЛФ 400, но только с индуктивным балластом. Колба лампы в верхней своей части имеет сложную форму и покрыта зеркальным отражающим слоем, который позволяет обойтись без отражателя. Кроме того, преимущество этих ламп состоит в том, что они имеют вращающийся цоколь, который позволяет наиболее полно использовать световой поток лампы. Схема зажигания ламп REFLUX 350 аналогична схеме зажигания ламп ДРЛФ 400. Для ламп REFLUX 400 требуется зажигающее устройство.

Из исследований по размещению облучателей сделаны следующие выводы. Для поддержания облученности в диапазоне 6...8 клк лампы ДРЛФ 400 необходимо размещать на расстоянии 1,0 м одна от другой при высоте подвеса 0,8 м, а лампы REFLUX 350 — на расстоянии 1,8 м при высоте подвеса 1,4 м. Следовательно, на один квадратный метр площади требуется примерно одна лампа ДРЛФ 400 и 0,8 лампы REFLUX 350. В таблице 1.24 приведены технические данные некоторых ламп высокого давления.

Для профилактики рахита, а также для обеззараживания помещений широко применяют дуговые ртутные трубчатые лампы типа ДРТ различной мощности.

1.9.4. ЭЛЕКТРООСВЕТИТЕЛЬНАЯ И ОБЛУЧАТЕЛЬНАЯ АРМАТУРА

Источник света вместе с арматурой образует светильник (облучатель). Арматура служит для перераспределения потока излучения в требуемом направлении, а также для защиты источника излучения от пыли, влаги и других неблагоприятных условий.

Характеристика светильника. Основные характеристики каждого светильника — светораспределение, защитный угол, коэффициент полезного действия.

Светораспределение светильника описывают кривой силы света, которая приведена в паспортных данных или в справочниках. Выделяют светильники: прямого света — в нижнюю полусферу излучается не менее 90 % всего потока излучения; преимущественно прямого света — в нижнюю полусферу излучается от 60 до 90 % всего потока излучения; рассеянного света — в каждую полусферу излучается от 40 до 60 % всего потока излучения; преимущественно отраженного света — в верхнюю полусферу излучается от 60 до 100 % всего потока излучения; отраженного света — в верхнюю полусферу излучается не менее 90 % потока излучения.

Защитный угол характеризует светильник с точки зрения защиты глаз от слепящего действия источника света. Он образуется горизонтальной линией, проходящей через нить накала, и линией, соединяющей крайнюю точку излучающего тела с противоположным краем отражателя. Обычно защитный угол применяемых светильников 12...40°.

Коэффициент полезного действия светильника — отношение светового потока светильника к световому потоку источника света:

$$\eta = \Phi_{\text{свет}} / \Phi_{\text{ист.}} \quad (1.132)$$

КПД светильника характеризует его экономичность. Обычно КПД составляет 0,45...0,9. При неудовлетворительном уходе может снижаться в 2 раза и более.

Освещение необходимо, чтобы различать детали, расположенные на какой-либо поверхности, создающей фон. Глаз реагирует на яркость детали и фона. Чем больше отличаются яркости, тем четче различимы элементы детали. Нормированная освещенность зависит от размера детали, контраста и фона. Контраст оценивают как малый, средний или большой.

Исполнение светильника. По исполнению различают светильники: открытые — лампа не отделена от внешней среды; закрытые — лампа и патрон отделены от внешней среды оболочкой без уплотнений; влагозащитные — корпус и патрон

защищены от воздействия влаги, а конструкция обеспечивает надежную изоляцию вводных концов друг от друга и от металлических частей светильника; пыленепроницаемые; взрывозащитные.

Для светильников, так же как и для всех электроустановок, существует международная классификация по защите от пыли и воды IP-XX (см. табл. 1.3 и 1.4).

Маркировка светильников. Первая буква означает *тип источника света* (Н — лампы накаливания общего назначения, Р — ртутные лампы типа ДРЛ, Л — люминесцентные трубчатые, И — кварцевые галогенные, Г — галогенные типа ДРИ, Ж — натриевая лампа, К — ксеноновые, С — лампы-светильники: зеркальные и диффузные);

вторая буква — *способ установки светильника* (С — подвесные, П — потолочные, Б — настенные, В — встраиваемые, Н — настольные, Т — напольные и венчающие, К — консольные, Р — ручные, Ф — ручные аккумуляторные, Г — головные, Д — пристраиваемые);

третья буква — *назначение светильника* (П — для промышленных предприятий, О — для общественных зданий, У — для освещения улиц, Р — рудничные, Б — бытовые);

четвертая буква — *номер серии* (двухзначное число в пределах 01...99);

пятая буква — *количество ламп*;

шестая буква — *мощность ламп* (перед ней знак умножения);

седьмая буква — *модификация* (трехзначное число в пределах 001...999);

восьмая буква — *климатическое исполнение и категория размещения*.

Далее приведены данные по числу ламп в светильнике, мощности ламп в ваттах, номеру модификации и климатическому исполнению (см. табл. 1.1).

Наряду с этим установлены пять категорий размещения электротехнических изделий (см. табл. 1.2).

Некоторые светильники имеют свои собственные имена, например «Астра-1».

В сельском хозяйстве находят применение светильники с лампами накаливания типа ФМ-60 (в фарфоровом корпусе рассеянного света), широко распространены плафоны сельскохозяйственные; светильники типа «Астра»; типов ПВЛ-1, ПВЛП-2х40 с люминесцентными лампами и др.

Для профилактики рахита у животных используют облучательные установки типа УО-3 с лампами ДРТ 400.

Для местного обогрева с одновременным УФ-излучением используют установки ИКУФ с лампами инфракрасными зеркальными типа ИКЗК мощностью 250 Вт и эритемной лампой типа ЭО мощностью 30 Вт.

1.9.5. ВИДЫ И СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Различают следующие виды освещения: рабочее, дежурное, аварийное, рекламное, охранное и т. д.

Рабочее освещение. Это основное освещение, обеспечивающее нормированную освещенность на всех точках рабочей поверхности с отклонениями не более -10 , $+20$ % нормы.

Рабочее освещение подразделяют на общее, местное и комбинированное. *Общее* освещение создает необходимую освещенность на всей площади, включая и рабочие поверхности. Оно может быть равномерным или локализованным. Его целесообразно применять, когда технологический процесс по своему характеру не требует напряжения зрения (освещенность 30...50 лк). Такое освещение дешевле по капитальным затратам.

Местное освещение служит для поддержания необходимой освещенности только в пределах рабочей поверхности. Светильники местного освещения должны оснащаться индивидуальными выключателями, располагаемыми в самом светильнике или в стационарной части электропроводки. В производственных помещениях запрещается применять только одно местное освещение. Его необходимо дополнять общим освещением всего помещения.

Комбинированное освещение — это сочетание общего и местного освещения. В большинстве случаев этот вид освещения требует меньшей мощности, но дороже по первоначальным капитальным затратам, чем одно общее освещение. Комбинированное освещение целесообразно применять при высокой точности работ, малой площади рабочих мест и редком их расположении. При этом освещенность на рабочей поверхности от светильников общего освещения должна составлять не менее 10 % нормируемой, но не ниже 150 лк для люминесцентных ламп и 75 лк для ламп накаливания.

Дежурное освещение. Его устанавливают в помещениях и на открытом воздухе там, где необходим контроль после окончания рабочей смены, например в животноводческом помещении. Внутри помещений для этой цели отводят 10 % светильников рабочего освещения при условии, что освещенность на лестничных клетках, в тамбурах должна быть не менее 0,5 лк, а на открытых территориях — не менее 0,2 лк.

Аварийное освещение. Его предусматривают наряду с рабочим в тех помещениях, где отсутствие света может привести к несчастному случаю, взрыву, пожару, длительному нарушению технологического процесса, прекращению снабжения потребителей водой, электроэнергией и т. д.

Аварийное освещение подразделяют на освещение безопасности и эвакуационное. Освещение *безопасности* предназначено для

продолжения работы при аварийном отключении рабочего освещения. При этом освещенность должна составлять не менее 10 % нормированной. Светильники рабочего освещения и светильники освещения безопасности должны питаться от независимых источников. В помещениях, где одновременно может находиться более 20 человек, предусматривают эвакуационное освещение по основным проходам и световые указатели «выход». В закрытых помещениях аварийное освещение должно быть не менее 0,5 лк, на открытых пространствах — не менее 0,2 лк. Аварийное освещение можно использовать как дежурное или охранное освещение в нерабочее время. Для аварийного освещения рекомендуется применять светильники с лампами накаливания или люминесцентными.

1.9.6. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСВЕЩЕНИЯ

Для расчета освещения необходимо знать следующее:
план помещения с расстановкой в нем технологического оборудования;

высоту помещения;

характер производимых работ;

категорию помещения;

требования технологической части к искусственному освещению.

Расстояние светильника от потолка зависит от высоты помещения. В животноводческих помещениях светильники размещают вдоль проходов. После выбора типа светильников, высоты подвеса и их размещения приступают к расчету освещенности. Основной нормативный документ при выборе освещенности — Строительные нормы и правила (СНиП). Нормы устанавливают минимальную освещенность на рабочей поверхности в точке с наихудшими условиями освещенности.

Расчет освещения проводят тремя методами: точечным методом; методом коэффициента использования светового потока; методом удельной мощности.

Точечный метод. Этот метод применяют при расчете: общего локализованного освещения; местного освещения; освещения негоризонтальных поверхностей; наружного освещения и как проверочный метод при всех других способах расчета.

Последовательность расчета

1. На плане помещения с нанесенными на него светильниками выбирают контрольные точки.

2. Для каждой контрольной точки определяют условную освещенность.

Освещенность в контрольной точке на горизонтальной поверх-

ности от одного светильника

$$E_{\text{гор}} = \frac{I_{\alpha} \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad (1.133)$$

где $E_{\text{гор}}$ — освещенность в точке K горизонтальной поверхности (рис. 1.78); I_{α} — сила света по направлению к расчетной точке K ; α — угол между направлением света и нормалью к расчетной плоскости; h — высота расположения светильника над расчетной плоскостью.

Ввиду того что справочные кривые силы света светильников строят для условной лампы со световым потоком 1000 лм, для получения фактической освещенности необходимо условную освещенность, рассчитываемую по формуле (1.133), умножить на коэффициент, равный отношению светового потока лампы к 1000.

Вертикальная освещенность

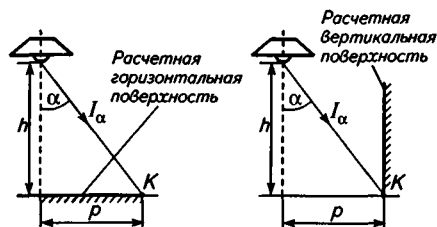
$$E_{\text{верт}} = E_{\text{гор}} n = E_{\text{гор}} \frac{p}{h}, \quad (1.134)$$

где $E_{\text{верт}}$ — освещенность в точке K вертикальной поверхности; p — проекция (см. рис. 1.78); h — высота подвеса светильника над горизонтальной плоскостью, проходящей через расчетную точку.

Если освещенность в точке создается несколькими светильниками, то полная освещенность будет равна сумме освещенностей от отдельных светильников.

Метод коэффициента использования светового потока. Его применяют для расчета общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей с учетом отраженных световых потоков от стен, потолка и не применяют при расчете локализованного освещения, освещения наклонных поверхностей, местного освещения.

Расчетная формула метода использования светового потока имеет вид:



$$\Phi = \frac{E_{\text{норм}} k_3 S Z}{NI}, \quad (1.135)$$

где $E_{\text{норм}}$ — нормируемая освещенность; k_3 — коэффициент запаса (табл. 1.25); S — площадь освещенной поверхности; Z — коэффициент минимальной освещенности, равный 1,1...1,2; N — число светильников; I — коэффициент использования светового потока.

Рис. 1.78. Схема расчета освещения точечным методом для контрольной точки K

Последовательность расчета

1. Выбирают тип источника света и тип светильника, их расположение и число.

2. Определяют уровень нормированной освещенности ($E_{нор}$).

3. Определяют индекс помещения (i).

4. По справочнику определяют коэффициент использования светового потока (\mathcal{I}).

5. Определяют коэффициент запаса и минимальной освещенности (Z).

6. Вычисляют по формуле (1.135) требуемый световой поток источника света в светильнике.

7. По каталогам для выбранного типа ламп выбирают ближайшую лампу по световому потоку. При этом, если ближайшие стандартные лампы имеют световой поток, отличающийся от расчетного более чем на $-10...+20\%$, выбирают лампу с большим световым потоком и формулу (1.135) решают относительно количества светильников (N).

8. Определяют суммарную мощность осветительных установок.

1.25. Коэффициент запаса

Характеристика объекта	Коэффициент запаса		Расчетная частота чистки светильников
	для ламп накаливания	для люминесцентных ламп	
Помещения с большим выделением пыли, копоти, дыма (мельницы, кузницы и т. д.)	1,7	2,0	4 раза в месяц
Помещения со средним выделением пыли, копоти, дыма (деревообделочные мастерские и т. д.)	1,5	1,8	3 раза в месяц
Помещения с малым выделением пыли, копоти, дыма (механические цеха, общественно-бытовые и т. д.)	1,3	1,5	2 раза в месяц
Наружное освещение светильниками	1,3	1,5	3 раза в год

Индекс помещения определяют по выражению:

$$i = \frac{S}{h(A+B)},$$

где h — расчетная высота; A и B — длина сторон помещения.

Метод удельной мощности. Это упрощенный метод расчета. Его используют при ориентировочных расчетах в целях учета осветительной нагрузки по таблицам удельной мощности.

Удельная мощность

$$P_{уд} = P_{уст}/S, \quad (1.136)$$

где $P_{уст}$ — установленная мощность; S — площадь помещения.

Удельная установленная мощность ($P_{уст}$) — мощность, Вт, которую необходимо предусмотреть на 1 м² площади по наружному обмеру для получения требуемой освещенности (табл. 1.26). Максимальная мощность ($P_{уст\ max}$) — наибольшая установленная мощность одновременно включенных ламп, отнесенная к площади того же помещения.

1.26. Удельная мощность осветительной нагрузки

Потребители	Удельная мощность осветительной нагрузки, Вт/м ²		Средняя мощность светоточки, Вт	Время использования за год, ч
	установленная	максимальная		
<i>Животноводческие помещения</i>				
Коровник:				
с доильной площадкой	4	1,6	60	700
при доении в стойлах	4,5	2,5	90	700
Доильная площадка	13	8	100	600
Свинарник:				
маточник	4,5	2	75	700
откормочник	2,6	1,3	75	500
Телятник	3,7	1,8	75	700
Скотный двор при откорме на мясо	3,2	1	60	500
Молочная	15,5	7	100	800
Овчарня для овцематок	3,5	1,5	60	500
Конюшня	2,3	1	60	500
Птичник с дополнительным освещением	5	3	75	800
Кормоприготовительный цех	7	5	100	700
Пункт искусственного осеменения животных	25	18	100	700
Лаборатория	15,5	7	100	700
<i>Производственные помещения</i>				
Слесарно-механическая мастерская	12	6	150	1500
Деревоотделочная мастерская	12	6	150	1500
Мельница	14	7	150	600
Гараж, пожарное депо	11	5	10	600
<i>Общественные помещения</i>				
Библиотека	17	8	100	900
Баня	33	15	150	800
Детский сад, ясли	24	16	150	1000
Кантора, дом приезжих	16	8	100	800
Магазин:				
торговый зал	21	21	75	800
подсобные помещения	12	6	100	800
Клуб:				
зрительный зал	20	20	100	1200
фойе	27	27	75	1200
вспомогательные помещения	16	10	100	1200
Чайная	16	8	10	1000
Прачечная	25	12	10	600
Сельсовет	18	9	100	800

Потребители	Удельная мощность осветительной нагрузки, Вт/м ²		Средняя мощность светоточки, Вт	Время использования за год, ч
	установленная	максимальная		
Больница	21	10	100	1200
Медпункт	21	15	100	800
Отделение связи	27	13	100	600
Школа	30	18	150	800
Столовая:				
зал	21	21	100	800
подсобные помещения	18	10	75	800
Хлебопекарня	22	11	130	800
<i>Складские помещения</i>				
Склад оборудования и материалов	3	1	100	600
Яйцесклад	6	3	100	600
Склад минеральных удобрений	2	1	100	600
Зерно- и овощехранилище	2	1	100	600
Весовая	12	8	150	600
<i>Жилые помещения</i>				
Одноквартирный дом	375	300	75	1000
Двухквартирный дом	750	500	75	1000
<i>Улицы и площади</i>				
Улицы	2	2	150	1200
Площади	1	1	150	1200

По $P_{уст\ max}$ рассчитывают сеть и выбирают мощность подстанции. $P_{уст\ max}$ всегда меньше $P_{уст}$, так как обычно не все лампы, имеющиеся в помещении, включают одновременно.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое воздействие оказывает оптическое излучение на биологические объекты? 2. Каково назначение осветительных и облучательных установок? 3. Расскажите о лампах накаливания, области применения, преимуществах и недостатках. 4. Расскажите о люминесцентных лампах, области применения, преимуществах и недостатках. 5. Поясните схему включения люминесцентных ламп. 6. Что такое стробоскопический эффект? 7. Расскажите о компактных люминесцентных лампах, области применения, преимуществах и недостатках. 8. Расскажите о разрядных лампах высокого давления, области применения, преимуществах и недостатках. 9. Перечислите основные характеристики светильника. Поясните каждый. 10. Назовите виды и системы освещения. 11. Опишите методы расчета освещения.

1.10. СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ, ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Существует два способа преобразования электрической энергии в тепловую — это прямое и косвенное преобразование.

Прямое преобразование — способ, при котором энергия электрического тока, электромагнитных полей, потока электронов по-

глощается средами (телами) и преобразуется в них в теплоту. Количество выделяющейся при этом теплоты пропорционально с учетом потерь работе внешней ЭДС, затраченной на производство поглощенной энергии.

Косвенное преобразование — способ, при котором электрическая энергия переносит теплоту от одной среды к другой. При этом температура источника теплоты может быть ниже температуры приемника. Количество поступившей к телу теплоты может в несколько раз превышать затраченную на это электрическую энергию.

1.10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Электронагревательные установки (ЭНУ) классифицируют по способам теплопередачи, технологическому назначению, способу преобразования электроэнергии в тепловую (табл. 1.27), а также по роду тока и частоте.

1.27. Классификация ЭНУ по способу преобразования электрической энергии в тепловую

Способ нагрева	Способ преобразования энергии	Применение ЭНУ
Сопротивлением (прямой или косвенный нагрев)	Электрическая энергия преобразуется в тепловую при прохождении тока через проводящие материалы	Нагрев металлов под ковку и термообработку; плавка металлов; нагрев воздуха, воды, пищевых продуктов; нагрев ограждающих поверхностей помещений. Электрические печи сопротивления; электрокалориферные установки, электрические водонагреватели; электродные котлы и парогенераторы, электродные установки для термообработки кормов; электрические панели и коврики
Электрической дугой	С помощью дугового разряда электрическая энергия преобразуется в тепло	Плавка металлов; получение феррисплавов и абразивов; электросварка, нагрев газов, резка металлов. Электрические дуговые печи прямого и косвенного нагрева; плазменные дуговые установки; рудотермические печи
В переменном магнитном поле (индукционный нагрев)	Сначала электрическая энергия преобразуется в энергию переменного магнитного поля, а лишь затем в тепловую в проводящих материалах, помещенных в это поле	Плавка металлов; нагрев металлов под ковку и термообработку; нагрев металлов для передачи тепла охлаждающей жидкости или газу. Индукционные плавильные печи; нагревательные индукционные установки; индукционные нагревательные панели; индукционные водонагреватели

Способ нагрева	Способ преобразования энергии	Применение ЭНУ
В переменном электрическом поле (диэлектрический)	Электрическая энергия преобразуется в энергию переменного электрического поля, далее в тепловую в диэлектрических и полупроводниковых материалах, находящихся в этом поле	Нагрев диэлектрических материалов и пластмасс под полимеризацию и пластическую деформацию; сушка древесины и сельскохозяйственной продукции. Обработка семян для улучшения посевных и урожайных качеств. Установки для сварки термопластичных материалов; установки для склеивания и сушки древесины и др.
Электронным пучком	Электроэнергия подводится к устройству, генерирующему электронный пучок, а затем энергия теплового пучка преобразуется в тепловую в телах, бомбардируемых электронными пучками	Плавка и нагрев металлов в вакууме; напыление; зонная плавка; сварка; резка. Электронные плавильные и нагревательные установки; установки для зонной плавки
Инфракрасный или квантовый нагрев	Электроэнергия преобразуется в лучистую, далее в тепловую в телах, на которые попадает этот лучистый поток	Отопление помещений; обогрев людей, птицы и животных; сушка лакокрасочных покрытий; сушка сельскохозяйственной продукции; резка и сварка материалов; обработка семян для улучшения их посевных и урожайных качеств. Инфракрасные облучатели и сушилки; лазерные установки

При использовании ЭНУ необходимо выполнять тепловой, электрический, аэродинамический, гидравлический и механический расчеты.

Тепловой расчет проводят в целях определения технических данных установок, обеспечивающих следующие технологические требования: мощность, температура поверхности нагревательных элементов, интенсивность теплоотдачи, параметры тепловой изоляции, значение теплового КПД.

Электрический расчет тесно связан с тепловым и состоит в выборе напряжения питания, рода тока, частоты, в определении геометрических размеров нагревателя, КПД, коэффициента мощности, в разработке схемы управления и способа регулирования мощности.

Аэродинамический расчет связан с нахождением расхода воздуха или какого-то другого газа, выступающего в роли теплоносителя, проходящего через установку, выбором вентиляторов, определением сечения воздухопроводов и размеров распределительных решеток. От правильности решения этого вопроса зависит теплоот-

дача нагревательных элементов, а следовательно, срок службы установки, тепловой и электрический КПД.

Гидравлический расчет выполняют для определения расхода жидкости через установку, выбора насоса и сечения трубопроводов.

Механический расчет проводят в целях определения геометрических размеров установки, массы и материалоемкости.

1.10.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ ПЕРВОГО РОДА

Для расчета электрических характеристик, режима нагрева и технических показателей электротермической установки необходимо знать электрическое сопротивление проводника и его зависимость от основных определяющих факторов.

Сопротивление проводника, Ом, имеющего длину l , м, и площадь поперечного сечения σ_A , м², постоянному току

$$R = \rho_T \frac{l}{\sigma_A}, \quad (1.137)$$

где ρ_T — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м.

Удельное электрическое сопротивление проводника — один из основных физических факторов, влияющих на электротехнические характеристики нагрева: силу тока, напряжение и мощность электротермической установки. Удельное электрическое сопротивление металлических проводников (проводников первого рода) зависит от материала, химического состава, механической и термической обработки и температуры.

Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры описывают формулой

$$\rho_T = \rho_{293}(1 + \alpha_T \Delta T + \beta_T \Delta T^2 + \gamma_T \Delta T^3 + \dots), \quad (1.138)$$

где ρ_{293} — удельное сопротивление проводника при 293 К; α_T , β_T , γ_T — температурные коэффициенты сопротивления соответствующего материала; К⁻¹, К⁻² и К⁻³; ΔT — превышение температуры проводника над 293 К; $\Delta T = T - 293$.

Полное сопротивление, Ом, металлических проводников переменному току

$$Z = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}, \quad (1.139)$$

где R_2 и X_2 — активное и индуктивное сопротивления проводника переменному току, Ом.

Активное сопротивление цилиндрического проводника с учетом поверхностного эффекта

$$R_2 = Rk_n = R(1 + 0,55k_6^2 = 0,02k_6^4) \text{ при } k_6 = 0 \dots 2;$$

$$R_2 = 1,4Rk_6 \text{ при } k_6 > 2,$$

где R — сопротивление проводника постоянному току, Ом; k_n — коэффициент поверхностного эффекта; k_6 — безразмерный коэффициент,

$$k_6 = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \mu_r}{\rho_T}},$$

где r — радиус цилиндрического проводника, м; f — частота тока, Гц; $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м; μ_r — относительная магнитная проницаемость.

Индуктивное сопротивление, Ом, проводника:

$$X_2 = R \cdot 1,26k_6^2(1 - 0,33k_6^2), \text{ при } k_6 = 0 \dots 1,$$

$$X_2 = 0,84Rk_6, \text{ при } k_6 > 1.$$

1.10.3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА

Общие сведения. Электроконтактный нагрев сопротивлением предназначен для сквозного нагрева, контактной сварки, наплавки при восстановлении изношенных деталей и прогрева трубопроводов.

В электроконтактных установках широко применяют переменный ток, так как необходимые для нагрева токи в тысячи и десятки тысяч ампер при напряжении в несколько вольт наиболее просто могут быть получены лишь при помощи трансформаторов переменного тока. Установки электроконтактного нагрева деталей или заготовок подразделяют на *однопозиционные* и *многопозиционные* (рис. 1.79). В зависимости от требуемой скорости нагрева и производительности технологической линии используют ту или иную схему. По технико-экономическим соображениям наиболее выгодно применять многопозиционную схему с последовательным включением нагреваемых заготовок в электрическую цепь, так как в этом случае обеспечивается любой заданный темп выдачи нагретых заготовок с постепенным увеличением их температуры до заданного значения путем перекладывания заготовок с одной позиции на другую.

Вариант электроконтактного нагрева и нагревательной установки выбирают в зависимости от конкретных условий.

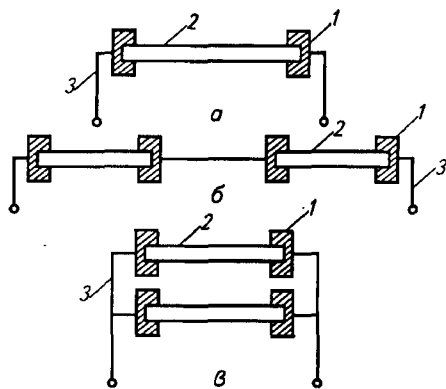


Рис. 1.79. Схемы однопозиционного (а) и многопозиционных устройств с последовательным (б) и параллельным (в) включением заготовок в электрическую цепь:

1 — зажимной токоподводящий контакт; 2 — нагреваемая заготовка; 3 — токоподводящий провод

Основные электротехнические характеристики электроконтактных нагревательных установок. Для любой электроконтактной установки определяют следующие расчетные параметры: мощность силового трансформатора, потребную силу электрического тока во вторичной цепи, напряжение на нагреваемой детали или заготовке, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

Исходные данные для их расчета — марка материала, масса нагреваемой детали и ее геометрические размеры, а также напряжение питающей сети, время и температура нагрева.

Полная мощность, В·А, силового трансформатора для однопозиционного устройства

$$S = \frac{k_3 \Phi}{\eta_{\text{общ}} \cos \varphi} = \frac{k_3 \Phi}{\eta_{\text{т}} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{тр}} \cos \varphi}, \quad (1.140)$$

где $k_3 = 1, 1, \dots, 3$ — коэффициент запаса; Φ — полезный тепловой поток; $\eta_{\text{общ}}$ — общий КПД установки;

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{т}} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{тр}},$$

где $\eta_{\text{т}}$ — термический КПД; $\eta_{\text{э}}$ — электрический КПД; $\eta_{\text{тр}}$ — КПД силового трансформатора.

Сила тока, А, во вторичной цепи при нагреве заготовок до температуры выше точки магнитных превращений

$$I_2 = \sigma_2 \sqrt{\frac{\rho_{\text{с}} \Delta T}{t \eta_{\text{т}} \rho_{\text{т}} k_{\text{п}}}}, \quad (1.141)$$

где σ_2 — площадь поперечного сечения заготовки, м²; ρ — плотность материала заготовки, кг/м³; $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность между конечной T_2 и начальной T_1 температурами нагрева заготовки, К.

Время нагрева зависит от диаметра заготовки и температурного перепада по ее длине и поперечному сечению. По технологичес-

ким условиям температурный перепад между внутренними и поверхностными слоями нагреваемой заготовки не должен превышать $\Delta T_{\text{п}} = 100$ К. В практических расчетах время нагрева, с, цилиндрических заготовок диаметром $d_2 = 0,02 \dots 0,1$ м, с $\Delta T_{\text{п}} = 100$ К определяют по эмпирической формуле

$$t = 2,5 \cdot 10^4 d_2^2. \quad (1.142)$$

Если заготовка нагревается до температуры ниже точки магнитных превращений, то при определении силы тока во вторичной цепи учитывают поверхностный эффект, степень влияния которого зависит от магнитной проницаемости.

Применительно к электроконтактному нагреву эмпирическая зависимость, устанавливающая связь между током I_2 , относительной магнитной проницаемостью μ_2 заготовки и ее диаметром, имеет вид:

$$I_2 = 1,35 \cdot 10^6 d_2 / \mu_2^{1,25}. \quad (1.143)$$

Искомое значение силы тока I_2 определяют решением уравнений (1.141) и (1.143). В практических расчетах обычно задаются различными значениями μ_2 и по формулам (1.141) и (1.143) определяют силу тока I_2 . Одинаковое значение силы тока, найденное по указанным формулам, будет искомой величиной в данный момент времени.

Силовые трансформаторы электроконтактных установок работают в повторно-кратковременном режиме, относительную продолжительность включения которого можно описать следующим выражением:

$$\epsilon_x = t_{\text{н}} / (t_{\text{н}} + t_3), \quad (1.144)$$

где $t_{\text{н}}$ — время нагрева заготовок, с; t_3 — время загрузочно-разгрузочных и транспортных операций, с.

Полная расчетная мощность, кВ·А, силового трансформатора с учетом ϵ_x

$$S_{\text{расч}} = S \sqrt{\epsilon_x}. \quad (1.145)$$

1.10.4. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ СВАРКА

При *контактной сварке* или сварке сопротивлением места соприкосновения деталей нагреваются до температуры пластического состояния благодаря прохождению через них электрического тока. Переходное сопротивление в месте соприкосновения деталей значительно превосходит их сопротивление, поэтому сами детали непосредственно от тока нагреваются очень мало, тогда как в стыках выделяется большое количество энергии.

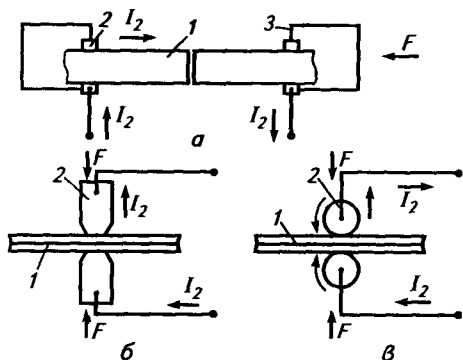


Рис. 1.80. Разновидности контактной сварки:

a — стыковая; *б* — точечная; *в* — роликовая; *1* — деталь; *2* — зажимной токоподводящий контакт; *3* — контактная перемычка

Количество теплоты, выделяемое в местах сварки, пропорционально сопротивлению контакта стыка.

Переходное сопротивление, Ом, электрического контакта

$$R_{\text{п}} = k_1 k_{\text{т}} / (0,1 F)^m, \quad (1.146)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от материала свариваемых деталей (табл. 1.28); F — усилие сжатия, приложенное к контакту, Н; m — показатель степени, зависящий от формы поверхностей контактирующих деталей (см. табл. 1.28); $k_{\text{т}}$ — коэффициент, учитывающий температуру контакта

$$k_{\text{т}} = 1 + 0,67 \alpha_{\text{т}} (T_{\text{к}} - 293), \quad (1.147)$$

где $\alpha_{\text{т}}$ — температурный коэффициент сопротивления контактов, K^{-1} ; $T_{\text{к}}$ — температура контакта, К.

1.28. Значения коэффициента k_1 и показателя степени m

Материал контактов	k_1	Форма контактирующих деталей	m
Алюминий — алюминий	0,006	Плоскость — плоскость	1,0
Алюминий — сталь	0,0044	Сфера — сфера	0,75
Латунь — сталь	0,003	Линейный контакт	0,5
Сталь — сталь	0,0076	—	—

В производстве широко используют следующие виды сварки: стыковую, точечную и роликовую (рис. 1.80).

1.10.5. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДНОГО НАГРЕВА

Электродный нагрев применяют для нагрева электропроводящих материалов, обладающих ионной проводимостью. По принципу действия электродный нагрев относят к прямому, так как сам материал представляет собой среду, в которой электрическая энергия превращается в тепловую. Электроды служат лишь для подвода электрического тока к нагреваемому материалу.

В электродных аппаратах используют только переменный ток во избежание электролиза воды. Электроды изготовляют из металлических материалов: титана, нержавеющей и углеродистой стали,

электротехнического графита и др. При плотности тока до $2 \cdot 10^3$ А/м² для изготовления электродов по условиям коррозионной стойкости целесообразно применять нержавеющую сталь, а при больших значениях плотности тока — углеродистую. Для изготовления электродов не рекомендуется использовать медь, алюминий и оцинкованную сталь из-за низкой коррозионной стойкости и загрязнения воды продуктами коррозии этих материалов.

Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, воды при температуре 293 К,

$$\rho_{293} = \frac{U_3 A_3}{I h_3}, \quad (1.148)$$

где U_3 — падение напряжения между зондами специального прибора для измерения удельного электрического сопротивления воды, В; A_3 — площадь сечения воды в сосуде, перпендикулярного силовым линиям, м²; I — сила тока в цепи электродов, А; h_3 — расстояние между зондами, м.

Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре T слабых растворов электролитов, в том числе и природной воды, описывается гиперболической функцией от температуры:

$$\rho_T = \frac{\rho_{293}}{1 + \alpha_T (T - 293)}, \quad (1.149)$$

где ρ_{293} — удельное электрическое сопротивление при температуре 293 К; α_T — температурный коэффициент электрического сопротивления, отражающий относительное уменьшение электрического сопротивления при возрастании температуры на 1 К.

Для растворов щелочей и солей $\alpha_T = 0,02 \dots 0,035$ К⁻¹, для кислот $\alpha_T = 0,01 \dots 0,016$ К⁻¹. В практических расчетах ρ_T определяют по упрощенному выражению, принимая $\alpha_T = 0,025$ К⁻¹.

Удельное электрическое сопротивление такой сложной по структуре рабочей среды — пароводяной смеси — зависит от температуры и концентрации солей в котловой воде, объема пара, содержания, конструктивных параметров электродной системы и других параметров. При расчете паровых котлов удельное электрическое сопротивление пароводяной смеси определяют по опытным данным. Для электродной системы с коаксиальными цилиндрическими электродами удельное электрическое сопротивление, Ом·м, пароводяной смеси

$$\rho_{п.с} = \rho_T \beta = \rho_T \left[1 + 27,4 \left(\frac{P}{d_B h r_0 \rho_n} \right)^3 \right], \quad (1.150)$$

где ρ_T — удельное электрическое сопротивление воды при температуре кипения,

Ом·м; β — коэффициент, учитывающий влияние парообразования на удельное электрическое сопротивление котловой воды; P — мощность электродной системы парового котла, Вт; d_n — диаметр внутреннего электрода, м; h — высота электродной системы котла, м; r_0 — теплота парообразования, Дж/кг; ρ_n — плотность пара при заданном давлении, кг/м³.

Для экранированной электродной системы с пластинчатыми электродами, расположенными под углом 120°, и термосифонной циркуляции котловой воды влияние парообразования на удельное электрическое сопротивление воды может быть учтено поправочным коэффициентом $\beta = 1,25 \dots 1,3$.

Для нормальной и безаварийной работы водонагревателей и паровых котлов необходимо контролировать и поддерживать на заданном расчетном уровне удельное электрическое сопротивление рабочей среды, плотность электрического тока на электродах и напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве. При уменьшении удельного электрического сопротивления воды по сравнению с расчетным появляются зоны с повышенными напряженностью поля и плотностью тока на электродах, увеличивается интенсивность образования накипи и коррозии электродов. Возрастает возможность пробоя межэлектродного промежутка и электролиза воды с выделением взрывоопасного гремучего газа, что приводит к неустойчивой работе и выходу из строя водонагревателя и парового котла. При разработке электродных аппаратов необходимо стремиться к созданию условий, выравнивающих по зонам нагрева удельное электрическое сопротивление, напряженность электрического поля и плотность тока, которые в основном определяются формой и размерами системы. В системах с дуговыми пластинчатыми и коаксиальными цилиндрическими электродами напряженность электрического поля и плотность тока в поперечном сечении межэлектродного пространства не остается постоянной:

$$E = \frac{U}{\ln(r_n/r_b)} \frac{1}{r}; \quad (1.151)$$

$$J = \frac{U}{\rho_T \ln(r_n/r_b)} \frac{1}{r}, \quad (1.152)$$

где U — напряжение между электродами, В; r_n и r_b — радиус наружного и внутреннего электродов, м; r — текущий радиус точки в межэлектродном пространстве.

При $r = r_b$ напряженность поля и плотность тока максимальные: E_{\max} и J_{\max} .

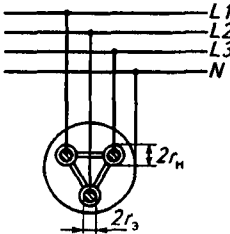
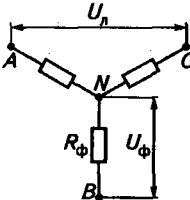
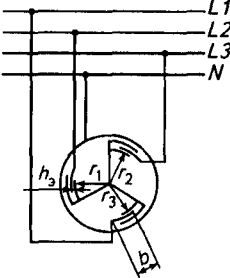
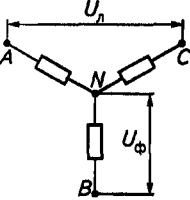
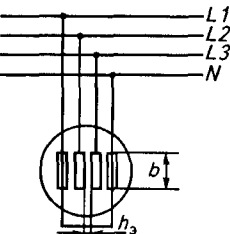
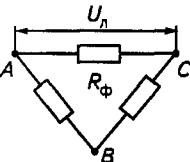
Объемная плотность мощности пропорциональна квадрату напряженности электрического поля

$$P_V = E^2/\rho_T. \quad (1.153)$$

Фактическая максимальная напряжённость электрического поля в межэлектродном пространстве и плотность тока на электродах для принятой электродной системы не должны превышать допустимых значений по условиям возможного пробоя межэлектродного пространства и электролиза воды.

Максимальная напряжённость E_{\max} электрического поля для наиболее часто применяемых электродных систем определяют по формулам, приведенным в таблице 1.29.

1.29. К электрическому расчету электродных аппаратов

Конструктивная схема аппарата	Схема соединения	Максимальная напряжённость электрического поля	Геометрический коэффициент формы электродов
		$E_{\max} = \frac{U_{\phi}}{r_3 \ln(r_H/r_3)}$	$k_{э.г} = \frac{1}{2\pi} \ln(r_H/r_3)$
		$E_{\max} = k \frac{U_{\phi}}{h_3}$ $k > 1$	$k_{э.г} = \frac{r_3 \ln(r_1/r_3) \ln(r_3/r_2)}{\ln(r_1/r_2)}$
		$E_{\max} = k \frac{U_{\phi}}{h_3}$ $k > 1$	$k_{э.г} = \frac{h_3}{b}$

Допустимая плотность тока, А/м², на электродах

$$J_{\text{доп}} = \frac{E_{\text{доп}}}{\rho_+ \beta} \quad (1.154)$$

Для электродных водонагревателей $\beta = 1$.
 Максимальная плотность тока, A/m^2 , на электродах:

$$J_{\max} = \frac{k_n I}{A_3}, \quad (1.155)$$

где $k_n = 1,1 \dots 1,4$ — коэффициент, учитывающий неравномерность плотности тока по поверхности электрода; I — сила тока, стекающего с электрода, А; A_3 — наименьшая активная поверхность электрода, m^2 .

Расчет электродных водонагревателей. Для нагрева воды и получения пара при единичной мощности нагревательной установки более 25 кВт применяют электродные водонагреватели и паровые котлы. Электродные устройства классифицируют по числу фаз, конструктивному исполнению, напряжению питающей сети, способу регулирования мощности и по назначению.

Цель расчета электродных аппаратов — выбор рациональной формы электродов и определение размеров электродной системы, определение мощности и диапазона ее регулирования, проверка работоспособности аппарата по напряженности поля и плотности тока на электродах.

Исходные данные для расчета: *проточных водонагревателей* — объемный расход воды V_1 , температура воды на входе $T_{вх}$ и выходе $T_{вых}$; *непроточных водонагревателей* — объем нагреваемой воды V ; время нагрева t ; начальная T_1 и конечная T_2 температура воды; *паровых котлов* — массовый расход пара m , рабочее давление H_p и температура кипения воды T_3 при заданном давлении.

Электрические схемы соединения электродных систем, наиболее часто применяемые в аппаратах, приведены в таблице 1.29. В зависимости от выбранной схемы определяют фазное сопротивление аппарата по заданным исходным данным.

Фазное сопротивление, Ом,
 при соединении звездой

$$R_{\phi} = U_n^2 / P, \quad (1.156)$$

при соединении треугольником

$$R_{\phi} = 3U_n^2 / P, \quad (1.157)$$

где U_n — линейное напряжение, В; P — мощность электродного аппарата, Вт.

Фазное сопротивление, Ом, электродного аппарата можно определить и по геометрическим размерам электродной системы

$$R_{\phi} = \frac{k_{э.г}}{h} \rho_T, \quad (1.158)$$

где $k_{э.г}$ — геометрический коэффициент электродной системы; h — высота элект-

родной системы, м; ρ_r — удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала, Ом·м.

Коэффициент $k_{э,г}$ для несложных электродных систем определяют на основе метода электростатической аналогии, а для сложных электродных систем — на основе конформных отображений.

В таблице 1.29 приведены расчетные формулы для определения коэффициента $k_{э,г}$ некоторых электродных систем, применяемых в электродных аппаратах.

Для любой температуры мощность, Вт, электродного аппарата по геометрическим параметрам электродной системы

$$P = \frac{3U_{\Phi}^2}{R_{\Phi}} = \frac{3U_{\Phi}^2 h}{\rho_r \beta k_{э,г}} = \frac{3U_{\Phi}^2 h (T - 253)}{40 \rho_{293} \beta k_{э,г}}. \quad (1.159)$$

Ширину b электрода обычно выбирают по конструктивным соображениям. Расстояние, м, между плоскопараллельными электродами рассчитывают исходя из допустимой напряженности поля

$$h_3 \geq \frac{U_{\Phi}}{E_{\text{доп}}}. \quad (1.160)$$

Для коаксиальных цилиндрических электродов оптимальное отношение диаметров наружного d_n и внутреннего d_b электродов принимает вид:

$$d_n/d_b = e = 2,718. \quad (1.161)$$

Минимальный диаметр внутреннего электрода d_b определяют исходя из максимальной плотности тока и допустимой напряженности поля. С учетом уравнения (1.155) максимальная плотность тока, А,

$$J_{\text{max}} = \frac{2k_n U_{\Phi}}{\rho_r d_b}. \quad (1.162)$$

С учетом уравнения (1.162)

$$d_b = \frac{2k_n U_{\Phi}}{E_{\text{доп}}}. \quad (1.163)$$

Для паровых котлов с пластинчатыми электродами, расположенными под углом 120° , расстояние между электродами, м,

$$h_3 = 2,18k_{э,с}, \quad (1.164)$$

где $k_{э,с}$ — коэффициент, зависящий от параметров электродной системы и рабо-

чих параметров парового котла, м,

$$k_{э.с} = \frac{k_{э.п} P_A h}{v_{п} \rho_{п}} \left(1 - \frac{T_{п.с} - 273}{273} \right), \quad (1.165)$$

где $k_{э.п}$ — электрический паровой эквивалент (отношение массы образованного пара к подведенной электрической энергии), кг/Дж; P_A — удельная поверхностная мощность, снимаемая с электрода, Вт/м²; h — высота электродов в зоне интенсивного парообразования, м; $v_{п}$ — скорость движения пузырьков пара, м/с (принимают $v_{п} = 0,28 \dots 0,30$ м/с); $\rho_{п}$ — плотность пара при заданном давлении в котле, кг/м³; $T_{п.с}$ — температура пароводяной смеси в котле, К.

Мощность электродного аппарата, Вт, для нагрева непроточной воды с учетом вышеперечисленных коэффициентов

$$P_2 = P_1 e^{t/\tau}, \quad (1.166)$$

где P_1 — мощность в начале нагрева, Вт, $P_1 = \frac{3U_{ф}^2 h (T - 253)}{40 \rho_{293} \beta k_{э.г}}$.

Время нагрева t определяет зависимость мощности непроточного водонагревателя от времени нагрева

$$t = \tau \ln \frac{T_2 - 253}{T_1 - 253}, \quad (1.167)$$

где τ — постоянная времени нагрева; T_1, T_2 — температура в начале и в конце процесса нагрева.

Из анализа вышеприведенных формул следует, что мощность непроточного водонагревателя изменяется в зависимости от температуры линейно, а от времени нагрева — по экспоненциальному закону.

1.10.6. ТЕПЛОВЫЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В зависимости от назначения и технологических условий нагрева применяют электрические нагреватели открытого, защищенного и герметического исполнения.

Исходные данные при расчете: мощность нагревателя, напряжение питающей сети, температура нагреваемой среды и условия теплообмена.

Расчет нагревателей основан на совместном решении уравнений, связывающих тепловые и электрические параметры нагревателя:

$$\Phi = \Phi_{\text{Апр}} A = \Phi_{\text{Апр}} \Pi I; \quad (1.168)$$

$$P = \frac{U_{\phi}^2}{R} = \frac{U_{\phi}^2 \sigma_A}{\rho_T l}, \quad (1.169)$$

где Φ — тепловой поток нагревателя, Вт; $\Phi_{\text{Апр}}$ — поверхностная плотность теплового потока нагревателя (провода), Вт/м²; A — площадь поверхности нагревателя, м²; l — периметр сечения нагревателя, м; l — длина нагревателя, м; P — мощность нагревателя, Вт; U_{ϕ} — фазное напряжение, В; R — электрическое сопротивление нагревателя, Ом; σ_A — площадь сечения нагревателя, м²; ρ_T — удельное электрическое сопротивление материала нагревателя, Ом · м.

Тепловой расчет нагревателя. Его сводят к определению рабочей температуры и удельного поверхностного теплового потока или необходимой площади поверхности нагревателя при заданной мощности и определенных условиях теплообмена.

Температура нагревательного сопротивления нагревателей защиты и герметического исполнения

$$T_c = \Delta T + T_{\text{п}} = \Phi R_T + T_{\text{п}}, \quad (1.170)$$

где ΔT — температурный перепад в слое изоляции между нагревательным сопротивлением и наружной поверхностью корпуса (оболочки), К; $T_{\text{п}}$ — температура теплоотдающей поверхности корпуса, К; Φ — полезный тепловой поток (или мощность) нагревателя в установившемся режиме, Вт; R_T — общее термическое сопротивление нагревателя, К/Вт.

Температура теплоотдающей поверхности нагревателя $T_{\text{п}}$ определяется условиями нагреваемой среды (табл. 1.30). В обогреваемых полах, ковриках температура теплоотдающей поверхности не должна превышать 300...305 К, в электропанелях — 358...363 К, а в электрокалориферах — 453 К.

1.30. Допустимая поверхностная плотность теплового потока $\Phi_{\text{Адоп}}$ для ТЭН

Обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева, $T_{\text{п}}$	Материал оболочки (трубки)	$\Phi_{\text{Адоп}}$, 10 ⁴ Вт/м ²
П Р Х	Вода, слабый раствор щелочей и кислот	Нагревание, кипячение	Нержавеющая сталь	11
			Углеродистая сталь	11
			Медь и латунь	7
Т	Воздух, газы, смеси газов	Нагрев в неподвижной среде до температуры на оболочке от 273 до 973 К	Нержавеющая сталь	5,0
С	То же	То же, до 723 К	Углеродистая сталь	2,2
О	»	Нагрев в подвижной воздушной среде (скорость не менее 6 м/с) до температуры на оболочке 723 К	То же	5,5

Обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева, T_p	Материал оболочки (трубки)	$\Phi_{\text{Адоп}}$ 10^4 Вт/м^2
К	Воздух, газы, смеси газов	То же, до температуры на оболочке от 723 до 873 К	Нержавеющая сталь	6,5
Э	Воздух, газы, смеси газов	Нагрев в подвижной среде (скорость не менее 6 м/с) до температуры на оболочке до 723 К	Углеродистая сталь	2,5
Н	То же	То же, до температуры на оболочке от 723 до 92 К	Нержавеющая сталь	5,1
И	Пищевые жиры и минеральные масла	Нагрев в сосудах, ваннах до температуры на оболочке 573 К	Углеродистая сталь	3,0
Ф	Легкоплавкие металлы, олово, свинец и др.	Нагрев, плавление в ваннах до температуры 723 К	То же	3,5

Термическое сопротивление R_T зависит от условий теплообмена, формы, размеров и конструктивного исполнения нагревателя (устройства). В зависимости от температуры теплодающей поверхности нагревателя и свойств нагреваемой среды теплообмен может осуществляться одновременно двумя или тремя видами теплоотдачи. При сложном теплообмене общее термическое сопротивление нагревателя определяют как сумму отдельных термических сопротивлений, последовательно преодолеваемых потоком теплоты. Общее термическое сопротивление, К/Вт, теплопроводности нагревателей герметического исполнения (ТЭН):

$$R_T = R_{T,о} + R_{T,н}, \quad (1.171)$$

где $R_{T,о}$ и $R_{T,н}$ — термические сопротивления оболочки (трубки) и наполнителя, К/Вт.

$$R_{T,о} = \frac{1}{2\pi\lambda_o l_a} \ln \frac{d_{о,н}}{d_{о,в}}; \quad (1.172)$$

$$R_{T,н} = \frac{1}{2\pi\lambda_n l_a} \ln \frac{d_{о,в}}{d_{с,н} k_c}, \quad (1.173)$$

где λ_o и λ_n — теплопроводность материала оболочки и наполнителя при рабочей температуре, Вт/(м·К); l_a — длина активной части ТЭН, м; $d_{о,н}$ и $d_{о,в}$ — наружный и внутренний диаметры оболочки ТЭН, м; $d_{с,н}$ — наружный диаметр нагревательного сопротивления (спирали) ТЭН, м; k_c — коэффициент, учитывающий различие условий теплообмена в реальном нагревателе и на модели.

При определенных диаметрах оболочки $d_{o,n}$, $d_{o,v}$ и расчетном тепловом потоке Φ длина, м, активной части нагревателя (ТЭН)

$$l_a = \frac{\Phi}{\pi d_{o,n} \Phi_{A\text{доп}}}, \quad (1.174)$$

где $\Phi_{A\text{доп}}$ — допустимая поверхностная плотность теплового потока на оболочке ТЭН (см. табл. 1.30), Вт/м².

Коэффициент, учитывающий различие условий теплообмена,

$$k_c = 1 - 0,215 \frac{d}{d_{c,n}} \left(\frac{l_{ш}}{d} - 0,6 \right) \left(1 + 2 \frac{d_{c,n}}{d_{o,v}} \right), \quad (1.175)$$

где d — диаметр проволоки спирали, м; $l_{ш}$ — шаг спирали, м.

Формулы (1.173) и (1.175) справедливы при следующих соотношениях параметров:

$$d_{c,n}/d_{o,v} = 0,33...0,835; l_{ш}/d = 2...6; d/d_{o,n} = 0,025...0,05.$$

Теплопроводность материала наполнителя определяют по таблице 1.31.

1.31. Характеристика электроизоляционных наполнителей

Наполнитель	Рабочая температура ТЭН, К	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура размягчения, К
Периклаз	973	1,5	3073
Электрокорунд	973	1,4	3273
Кварцевый песок	673	1,0	1973

В предварительных расчетах R_T и k_c определяют по усредненным соотношениям параметров. Соотношение $d/d_{c,n}$ принимают в пределах 0,1...0,16.

Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м², проводника

$$\Phi_{A\text{пр}} = \Delta T/r_T, \quad (1.176)$$

где r_T — удельное термическое сопротивление потоку теплоты с 1 м² поверхности провода, (м²·К)/Вт.

Для нагревателей цилиндрической формы (ТЭН)

$$r_T = R_T l_a \pi d_3, \quad (1.177)$$

где d_3 — диаметр эквивалентного цилиндрического стержня, теплоотдача которого равнозначна теплоотдаче спирали, м.

При выбранном диаметре оболочки $d_{0,в}$ и принятом усредненном соотношении $d_{с,н}/d_{0,в}$

$$d_э = k_c d_{0,в} (0,33 \dots 0,835). \quad (1.178)$$

При тепловом расчете открытых нагревателей определяют коэффициент теплоотдачи, температуру поверхности и поверхностную плотность теплового потока. Теплообмен открытых нагревателей с воздушно-газовой средой осуществляется преимущественно конвекцией и излучением.

В низкотемпературных электротермических установках преобладает *конвективный теплообмен*. Различают свободную и вынужденную конвекцию. При вынужденной конвекции на интенсивность теплоотдачи влияют форма, размеры нагревателя, схема обтекания потоком и скорость течения воздуха. При поперечном обтекании спиральных проволочных и зигзагообразных ленточных нагревателей коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), определяют по эмпирическим зависимостям:

при числе Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu} \leq 1000$$

$$\alpha = 10,79 \frac{\lambda_{в}^{0,62} c_{в}^{0,38} \rho_{в}^{0,47} \nu_{в}^{0,47}}{\mu_{д}^{0,24} d^{0,38}}. \quad (1.179)$$

При $Re \geq 1000$

$$\alpha = 2,73 \frac{\lambda_{в}^{0,62} c_{в}^{0,38} \rho_{в}^{0,62} \nu_{в}^{0,62}}{\mu_{д}^{0,24} d^{0,38}}, \quad (1.180)$$

где ν — скорость потока воздуха, м/с; d — размер обтекаемого воздухом тела (диаметр провода), м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с; $\lambda_{в}$ — теплопроводность воздуха, Вт/(м·К); $c_{в}$ — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); $\rho_{в}$ — плотность воздуха, кг/м³; $\mu_{д}$ — динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Теплофизические параметры воздуха выбирают по его средней температуре. Коэффициент термического сопротивления, (м²·К)/Вт, потока теплоты

$$r_{т} = l/\alpha. \quad (1.181)$$

При известном температурном перепаде между поверхностью нагревательного сопротивления (провода) и нагреваемым воздухом поверхностную плотность теплового потока определяют по уравнению (1.176).

Чтобы найти температуру теплоотдающей поверхности ребристых ТЭН и снимаемый с них тепловой поток, необходимо также знать коэффициент теплоотдачи.

При поперечном обтекании шахматных пучков орбренных труб (ТЭН) коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К),

$$\alpha = 0,213 \frac{\lambda_{\text{в}}}{l_{\text{ш.р}}^{0,35}} P_r^{0,35} \left(\frac{d_{\text{тр}}}{l_{\text{ш.р}}} \right)^{-0,54} \left(\frac{h_p}{l_{\text{ш.р}}} \right)^{-0,14} \left(\frac{v}{v} \right)^{0,65}, \quad (1.182)$$

где $l_{\text{ш.р}}$ — шаг ребер, м; $P_r = v/\alpha_{\tau}$ — число Прандтля; α_{τ} — температуропроводность воздуха, м²/с; $d_{\text{тр}}$ — наружный диаметр несущей трубы ТЭН, м; h_p — высота ребра, м.

В электротермических установках с рабочей температурой более 970 К (теплоаккумулирующие установки, электроречи) теплообмен осуществляется преимущественно *излучением*.

Для реального нагревателя допустимая поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²,

$$\Phi_A = \Phi_{\text{Инд}} k_{\text{эф}}, \quad (1.183)$$

где $\Phi_{\text{Инд}}$ — поверхностная плотность теплового потока идеального «серого» нагревателя, Вт/м²; $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности излучения нагревателя.

Значения $k_{\text{эф}}$ для различных условий работы нагревателя приведены в таблице 1.32.

1.32. Значения $k_{\text{эф}}$ при нагреве материала

Тип нагревателя и способ укладки	$k_{\text{эф}}$ при нагреве изделий из	
	стали $\epsilon_{\text{м}} = 0,8$	алюминия $\epsilon_{\text{м}} = 0,3$
Проволочный спиральный на трубе на полочке в пазу	0,46	0,5
	0,39	0,47
	0,31	0,35
Проволочный зигзагообразный в пазу свободно	0,56	0,63
	0,62	0,68

Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м², идеального «серого» нагревателя

$$\Phi_A = \Phi_{\text{Инд}} C_{1,2}, \quad (1.184)$$

где $\Phi_{\text{Инд}}$ — поверхностная плотность теплового потока идеального абсолютно черного нагревателя, Вт/м².

$$C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{\text{н}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{м}}} - 1}, \quad (1.185)$$

где $\epsilon_{\text{н}}$, $\epsilon_{\text{м}}$ — коэффициенты теплового излучения нагревателя и материала (изделия) (табл. 1.33).

1.33. Коэффициент теплового излучения некоторых материалов

Материал	Температура, К	ϵ
Графит	1273...3703	0,77...0,83
Кирпич амотный	293...1273	0,8...0,9
Латунь с тусклой поверхностью	323...623	0,22
Нихром	398...1308	0,64...0,75
Сталь	1213...1373	0,55...0,61
Цинк окисленный	673	0,11

Электрический расчет нагревателя. Его сводят к определению геометрических размеров нагревателя, обеспечивающих необходимую мощность и температуру его теплоотдающей поверхности. В установившемся режиме электрическая мощность равна тепловому потоку, отдаваемому с поверхности нагревателя, т. е. $P = \Phi$. Используя зависимость, можно записать соотношение

$$\frac{P}{\Phi_{\text{Апр}} \Pi} = \frac{U_{\Phi}^2 \sigma_A}{R \rho_T} \quad (1.186)$$

Для нагревателя круглого сечения $\Pi = \pi d$ и $\sigma_A = \pi d^2/4$. Подставляя эти значения в уравнение (1.186), получают формулу для расчета диаметра, м, нагревателя:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \rho_T P^2}{\pi^2 U_{\Phi}^2 \Phi_{\text{Апр}}}} \quad (1.187)$$

Длину нагревателя определяют из формулы (1.169) путем подстановки в нее выражения (1.187) с учетом, что $\sigma_A = \pi d^2/4$. Для нагревателя круглого сечения длина, м,

$$l = \sqrt[3]{\frac{P U_{\Phi}^2}{4 \pi \rho_T \Phi_{\text{Апр}}}} \quad (1.188)$$

Расчетные значения диаметра округляют до ближайших больших по сортаменту размеров.

В ТЭН применяют проволоку диаметром 0,25...1,6 мм. В электротермических установках средне- и высокотемпературного нагрева (970 К) по условиям надежности работы нагревателей открытого исполнения не рекомендуется использовать проволоку диаметром менее 5 мм. Диаметр проволочной спирали выбирают по условиям механической прочности.

Для нихромов

$$d_{\text{с.н}} = (7...10)d, \quad (1.189)$$

для железохромоалюминиевых сплавов (фехраль)

$$d_{с.н} = (5...7)d. \quad (1.190)$$

Шаг спирали

$$l_{ш} = (2...6)d. \quad (1.191)$$

Длина спирали

$$l_c = n_{в.с} l_{ш}, \quad (1.192)$$

где $n_{в.с}$ — число витков спирали, $n_{в.с} = \frac{1}{\sqrt{(\pi d_{с.н})^2 + l_{ш}^2}}$.

Размеры зигзагообразных проволочных нагревателей выбирают по условиям механической прочности и технологических возможностей изготовления:

высота зигзага

$$h_3 = (23...25)d; \quad (1.193)$$

шаг волны

$$l_{ш} \geq 5d; \quad (1.194)$$

длина «гармоники»

$$l_r = n_{в.г} l_{ш} \approx \frac{l}{2h_3} l_{ш}, \quad (1.195)$$

где $n_{в.г}$ — число волн в «гармонике».

1.10.7. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В расчетах часто применяют приближенные методы, основанные на использовании экспериментальных данных (в виде таблиц или графических зависимостей), которые отражают связь между силой тока нагрузки (I_n), температурой, размерами сечения и диаметром. Графические зависимости или табличные данные (табл. 1.34) получены для определенных (стандартных) условий, когда проволока натянута горизонтально в спокойном воздухе при температуре 293 К. Действительную температуру T_d поверхности приводят к расчетной $T_{расч}$ (табличной) при помощи коэффициентов монтажа и среды:

$$T_{расч} = T_d k_m k_c, \quad (1.196)$$

где k_m и k_c — коэффициенты монтажа и среды. Для стандартных условий $k_m = k_c = 1$.

1.34. Допустимые нагрузки на нихромовую проволоку, подвешенную горизонтально в спокойном воздухе, при температуре 293 К

Диаметр проволоки, мм	Площадь сечения, мм ²	Допустимые нагрузки, А, при расчетной температуре, К						
		473	673	873	973	1073	1173	1273
0,1	0,00785	0,1	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9	1,0
0,2	0,0314	0,65	1,03	1,4	1,65	1,82	2,0	2,3
0,3	0,085	1,05	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4	3,85
0,4	0,126	1,5	2,34	3,3	3,85	4,4	5,0	5,7
0,5	0,195	2	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
0,6	0,342	2,52	4,0	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,7	0,385	3,1	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3	11,8
0,8	0,503	3,7	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3	14,0
0,9	0,636	4,25	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5	16,5
1,0	0,785	4,85	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
1,1	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,2	1,13	6,0	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,3	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,4	1,54	7,25	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,6	2,01	8,6	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,8	2,54	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
2,0	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
2,5	4,91	16,6	27,5	40,0	46,6	57,5	66,5	73,0
3,0	7,07	22,3	37,5	54,5	64,0	77,0	88,0	102,0
4,0	12,6	37,0	60,0	80,0	93,0	110,0	129,0	151,0

С помощью коэффициента монтажа учитывают ухудшение теплоотдачи в реальном нагревателе по сравнению со стандартными условиями, в которых получены табличные данные ($k_M \leq 1$). Для проволоочной спирали в неподвижном воздухе $k_M = 0,8...0,9$; для спирали на изоляционном каркасе (стержне) $k_M = 0,7$; для спирали или провода в ТЭН, электрообогреваемом полу, почве, панели $k_M = 0,3...0,4$.

С помощью коэффициента среды учитывают улучшение теплоотдачи по сравнению со стандартными условиями за счет воздействия нагреваемой среды ($k_C \geq 1$). Для проволоочной спирали, проволоки в подвижном воздухе $k_C = 1,1...4,0$; для нагревателей защищенного и герметического исполнения в неподвижной воде $k_C = 2,5$; для нагревателей в подвижной воде $k_C = 2,8...3$. Значения k_C и k_M для других условий работы приведены в справочной литературе.

По принятой схеме соединения нагревателей сила тока, А, одного нагревателя

$$I_H = \frac{P_\Phi}{U_\Phi N_c}, \quad (1.197)$$

где P_Φ — фазная мощность ЭТУ, Вт; U_Φ — фазное напряжение сети, В; N_c — число параллельных ветвей (нагревателей) на одну фазу.

В соответствии с T_p и I_n по таблице 1.35 определяют площадь сечения и диаметр.

Необходимая длина, м, нагревательной проволоки на одну секцию (нагреватель)

$$l = \frac{U_{\phi}^2 \sigma_A}{P \rho_T}, \quad (1.198)$$

где ρ_T — удельное электрическое сопротивление проволоки при действительной температуре, Ом·м.

Габариты нагревателя рассчитывают по формулам (1.188)... (1.195).

Практический интерес представляют методы расчета, используемые на специализированных предприятиях при изготовлении нагревателей герметического исполнения (ТЭН). Исходные данные для расчета ТЭН — номинальная мощность и напряжение нагревателя, активная длина его оболочки и нагреваемая среда.

Расчет спирали для ТЭН. Последовательность расчета.

1. В соответствии с номинальной мощностью и развернутой длиной по таблице 1.35 выбирают необходимую активную поверхность нагревателя и определяют поверхностную плотность теплового потока, Вт/см², на наружной поверхности оболочки нагревателя.

$$\Phi_A = P/A_a, \quad (1.199)$$

где A_a — площадь активной поверхности нагревателя, см².

Расчетная поверхностная плотность теплового потока не должна превышать предельно допустимого значения, т. е. $\Phi_A \leq \Phi_{A\text{доп}}$.

1.35. Параметры оболочки ТЭН

Тип ТЭН	Длина заготовки l_1 , мм	Активная длина до обсадки $l_{a.л.}$, мм	Площадь активной поверхности A_a , см ²	Активная длина после обсадки $l_{a.п.}$, мм
ТЭН-32А13	285	205	98	240
ТЭН-44А13	385	305	147	360
ТЭН-50А13	440	360	171	420
ТЭН-60А13	520	440	212	520
ТЭН-70А13	600	520	253	620
ТЭН-78А13	675	595	286	700
ТЭН-85А13	730	650	314	770
ТЭН-100В13	860	780	376	920
ТЭН-120Б13	1020	890	436	1070
ТЭН-140Б13	1200	1070	520	1270
ТЭН-170Б13	1440	1310	640	1570
ТЭН-200Б13	1700	1570	764	1870
ТЭН-240Б13	2040	1910	926	2270
ТЭН-280Б13	2340	2210	1090	2670

2. Предварительно определяют диаметр, мм, нагревателя (проволоки):

$$d \geq 0,356 \sqrt[3]{\frac{P^2}{U_{\Phi}^2 \Phi_{\text{доп.пр}}}}, \quad (1.200)$$

где $\Phi_{\text{доп.пр}}$ — допустимая поверхностная плотность теплового потока проволоки, Вт/см². Значение $\Phi_{\text{доп.пр}}$ принимают по таблице 1.36 в зависимости от рабочей среды и характера нагрева.

1.36. Допустимая поверхностная плотность теплового потока нагревателя и проволоки

$\Phi_{\text{доп.}}$, 10 ⁴ Вт/м ² , при нагреваемой среде (см. табл. 1.30)					
С	И	Ф	О	П	Р
<i>На поверхности ТЭН</i>					
2,2	3,0	3,5	5,5	8,0	11
<i>На поверхности проволоки</i>					
12	14	16	21	30	38

По таблице 1.37 находят ближайший больший по сортаменту диаметр проволоки.

1.37. Параметры нихромовой проволоки (X15Н60)

Диаметр проволоки d , мм	Площадь сечения проволоки σ_d , мм ²	Площадь поверхности 1 м проволоки A_1 , см ² /м	Длина витка спирали l_n , мм	Коэффициент обсадки $k_{\text{обс}}$	Сопротивление 1 м проволоки R_1 при 293 К, Ом/м
0,16	0,0227	5,024	9,55	1,36	48,89
0,20	0,0346	6,28	9,05	1,34	32,08
0,25	0,0531	7,85	9,2	1,31	20,9
0,28	0,066	8,8	9,3	1,28	16,82
0,32	0,0881	10,05	9,45	1,26	13,0
0,36	0,1104	11,5	9,5	1,24	10,05
0,4	0,1352	12,56	10,3	1,21	8,21
0,45	0,1697	14,13	10,45	1,18	6,54
0,5	0,2082	15,7	10,62	1,15	5,38
0,56	0,2595	17,53	10,8	1,12	4,32
0,63	0,3317	19,18	11,39	1,08	3,38
0,7	0,4069	22,0	11,61	1,05	2,75
0,8	0,5278	25,1	11,93	1,03	2,12
0,9	0,6359	28,26	11,88	1,01	1,68
1,0	0,785	31,4	12,2	1,0	1,36

3. Номинальное сопротивление, Ом, спирали при рабочей температуре

$$R_{\text{ном}} = U^2_{\Phi} / P. \quad (1.201)$$

4. Номинальное сопротивление, Ом, спирали при 293 К

$$R_{293} = 0,95 R_{\text{ном}}. \quad (1.202)$$

5. Сопротивление спирали для намотки

$$R = k_{\text{обс}} R_{293}, \quad (1.203)$$

где $k_{\text{обс}}$ — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления проволоки в результате опрессовки методом обсадки (см. табл. 1.37).

6. Активная длина, м, нагревательной проволоки

$$l_{\text{а.п}} = R/R_1, \quad (1.204)$$

где R_1 — электрическое сопротивление 1 м проволоки, Ом/м (см. табл. 1.37).

7. Действительная поверхностная плотность теплового потока, Вт/см², нагревательной проволоки

$$\Phi_{\text{Апр}} = P/(A_l l_{\text{ап}}), \quad (1.205)$$

где A_l — площадь поверхности 1 м нагревательной проволоки, см²/м.

Если $\Phi_{\text{Апр}} > \Phi_{\text{Адоп.пр}}$, то необходимо увеличить диаметр проволоки.

8. Активное число витков спирали

$$n_{\text{а.в}} = l_{\text{а.п}} 10^3 / l_{\text{в}}, \quad (1.206)$$

где $l_{\text{в}}$ — длина витка спирали, мм (см. табл. 1.37).

9. Общее число витков спирали с учетом необходимой навивки на концы контактных стержней из расчета 10 витков на конец стержня

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{а.в}} + 20. \quad (1.207)$$

10. Шаг спирали, мм, до обсадки

$$l_{\text{ш}} = l_{\text{а.п}} / n_{\text{а.в}}, \quad (1.208)$$

где $l_{\text{а.п}}$ — активная длина нагревателя до обсадки, мм.

Расчетное значение $l_{\text{ш}}$ проверяют по условиям

$$\begin{aligned} d + 0,5 \text{ мм} < l_{\text{ш}} < 5d \text{ при } d < 0,63 \text{ мм;} \\ 1,9d < l_{\text{ш}} < 6d \text{ при } d > 0,63 \text{ мм.} \end{aligned}$$

11. Общая длина спирали

$$l_{\text{с}} = n_{\text{общ}} l_{\text{в}}. \quad (1.209)$$

1.10.8. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРОВОДА И КАБЕЛИ

В низкотемпературных процессах сельскохозяйственного производства широко применяют нагревательные провода и кабели. Промышленность выпускает одножильные нагревательные провода марок ПОСХВ, ПОСХП и ПОСХВТ.

Токопроводящую жилу изготавливают из стальной оцинкованной низкоуглеродистой проволоки диаметром 1,1 мм для проводов марки ПОСХВ и ПОСХП и диаметром 1,4 мм для проводов марки ПОСХВТ. В качестве изоляции в проводах марки ПОСХВ и ПОСХВТ используют поливинилхлоридный пластикат, а для провода марки ПОСХП — полиэтилен.

Промышленность выпускает нагревательные кабели марки КНМСС, КНМСН и др. В отличие от проводов кабели могут иметь до четырех токопроводящих жил из стальной проволоки, никрома, никеля или константана. Токопроводящие жилы размещают в одной, двух или трех оболочках из нержавеющей стали. Промежутки между оболочкой и жилой заполняют периклазом марки ПЭ-1М или ПЭ-ВМ. Снаружи кабель имеет оболочку, предохраняющую его от воздействия агрессивных сред и механических повреждений.

Провода и кабели предназначены для фиксированного монтажа при напряжении 220 В.

Технические характеристики некоторых нагревательных проводов и кабелей, выпускаемых промышленностью, приведены в таблице 1.38.

1.38. Технические характеристики нагревательных проводов и кабелей

Параметр	ПОСХВ	ПОСХП	ПОСХВТ	ПСО	КНМС, КМЖ
Диаметр жилы, мм	1,1	1,1	1,4	4...6	3×1
Диаметр провода с изоляцией, мм	2,9	2,3	3,4	—	—
Теплопроводность изоляции, Вт/(м·К)	0,17	0,3	0,2	—	—
Допустимая температура, К	343	343	378	403	523
Линейное сопротивление, Ом/м*	0,174	0,174	0,120	0,016...0,007	—
Срок службы, тыс. ч	12	12	12	300	2000
Термическое сопротивление изоляции, (м·К)/Вт	0,88	0,37	0,70	—	—

* При допустимой температуре.

Контрольные вопросы и задания

1. Поясните способ прямого преобразования электроэнергии в тепловую. 2. В чем заключается способ косвенного преобразования электрической энергии в тепловую? 3. Расскажите о классификации электронагревательных установок. 4. Расскажите об электрическом сопротивлении проводников первого рода. 5. Что представляет собой электроконтактный нагрев? 6. Перечислите основные элект-

ротехнические характеристики электроконтактных нагревательных установок. Дайте пояснения. 7. В чем заключается электроконтактная сварка? 8. Что такое электродный нагрев? 9. В чем заключается расчет электродных водонагревателей? 10. В чем заключается тепловой и электрический расчеты нагревателей? 11. Назовите приближенные методы расчета нагревателей. Дайте пояснения.

1.11. СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

1.11.1. ТИПЫ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Требования к типам системы заземления изложены в ГОСТ Р 50571.2, который разработан на основе стандарта МЭК 364-3 (1993), и поправки к нему, принятой в 1994 г. В стандарте МЭК 364-3 содержатся требования к типам системы заземления для систем переменного тока, а также излагаются основные характеристики, по которым должны оцениваться электроустановки зданий.

В п. 312.2 ГОСТ Р 50571.2 рассмотрены следующие типы системы заземления. TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT. В обозначениях типов системы заземления буквы имеют следующий смысл:

Первой буквой обозначают характер заземления источника питания:

T — одна точка токоведущих частей источника питания имеет непосредственное присоединение к земле;

I — все токоведущие части источника питания изолированы от земли или одна точка токоведущих частей имеет присоединение к земле через сопротивление.

Второй буквой обозначают характер заземления открытых проводящих частей электроустановки здания:

T — открытые проводящие части имеют непосредственное присоединение к земле, независимо от характера связи источника питания с землей;

N — открытые проводящие части имеют непосредственное соединение с заземленной точкой источника питания.

Последующие за N буквы (если таковые имеются) определяют особенности устройства нулевого защитного и нулевого рабочего проводников:

S — функции нулевого защитного (PE) и нулевого рабочего (N) проводников разделены между отдельными проводниками;

C — функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном общем проводнике (PEN-проводнике).

Типы систем заземления и их графические обозначения показаны на рисунках 1.81...1.85.

В системах TN источник питания (питающая сеть) имеет непосредственно присоединенную к земле точку. Открытые проводящие части электроустановки здания присоединяют к этой точке посредством защитных проводников. В зависимости от особенно-



Рис. 1.81. Обозначения специальных проводников:

PE — защитный проводник, нулевой защитный проводник; *N* — нулевой рабочий проводник; *PEN* — совмещенный нулевой защитный и рабочий проводник

стей устройства нулевого защитного и нулевого рабочего проводников (см. рис. 1.81) различают три типа системы TN:

система TN-C — функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены во всей системе (сети) в одном проводнике (см. рис. 1.82);

система TN-S — функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников разделены во всей системе (см. рис. 1.83);

система TN-C-S — функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном проводнике в части системы (сети) (см. рис. 1.84).

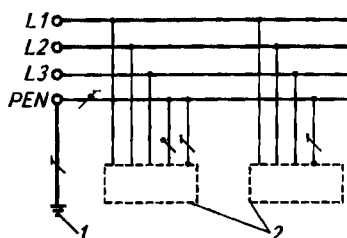


Рис. 1.82. Система TN-C (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники объединены во всей системе):

1 — заземление источника питания; 2 — открытые проводящие части

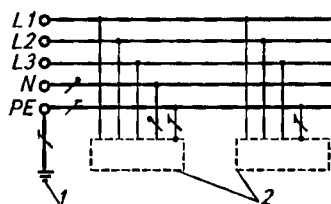


Рис. 1.83. Система TN-S (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники работают раздельно во всей системе):

1 — заземление источника питания; 2 — открытые проводящие части

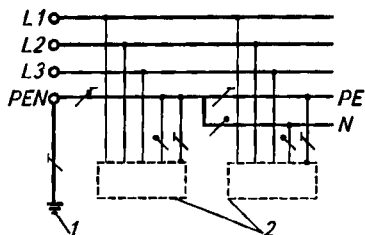


Рис. 1.84. Система TN-C-S (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники объединены в части системы):

1 — заземление источника питания; 2 — открытые проводящие части

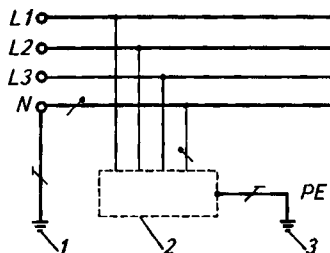


Рис. 1.85. Система заземления TT:

1 — заземление источника питания; 2 — открытые проводящие части; 3 — заземление

При типе системы заземления ТТ (см. рис. 1.85) источник питания (питающая сеть) имеет одну точку, непосредственно связанную с землей. Открытые проводящие части электроустановки здания соединяют с заземлителем, который должен быть электрически независимым от заземлителя источника питания.

В системе IT токоведущая часть источника питания (питающей сети) не имеет непосредственной связи с землей или заземлена через сопротивление. Открытые проводящие части электроустановки здания заземлены.

1.11.2. ЗАНУЛЕНИЕ И ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Зануление в электроустановках напряжением до 1000 В — преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора и трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

Защитный проводник (РЕ) в электроустановках — проводник, применяемый для защиты от поражения людей и животных электрическим током.

Нулевой защитный проводник в электроустановках до 1000 В — защитный проводник, соединенный с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора.

Нулевой рабочий проводник (N) в электроустановках до 1000 В — проводник, используемый для питания электроприемников, соединенный с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в трехпроводных сетях постоянного тока.

Совмещенный проводник в системах TN-C и TN-C-S — *PEN проводник* — проводник, который присоединен к заземленной нейтрали источника и одновременно выполняет функции нулевого защитного проводника (РЕ) и нулевого рабочего проводника (N).

Части, подлежащие заземлению или занулению:

корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т. п.;

приводы электрических аппаратов;

вторичные обмотки измерительных трансформаторов;

каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов;

металлические конструкции распределительных устройств, металлические кабельные конструкции, металлические корпуса кабельных муфт, металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, металлические оболочки проводов, стальные

трубы электропроводки и другие металлические конструкции, связанные с установкой электрооборудования;

металлические корпуса передвижных и переносных электроприемников.

Правила установки заземлений следующие. Заземления устанавливают на токоведущей части непосредственно после проверки отсутствия напряжения. Переносное заземление сначала присоединяют к заземляющему устройству, а затем после проверки отсутствия напряжения устанавливают на токоведущие части. Переносное заземление снимают в обратной последовательности: сначала с токоведущих частей, а потом отсоединяют от заземляющего устройства.

Установка и снятие переносных заземлений проводят в диэлектрических перчатках с применением в электроустановках выше 1000 В изолирующей штанги. Закрепляют зажимы переносных заземлений этой же штангой или непосредственно руками в диэлектрических перчатках.

Запрещается использовать для заземления проводники, не предназначенные для этой цели, а также присоединять заземления путем их скрутки.

Допускается в тех случаях, когда сечение жил кабеля не позволяет применить переносные заземления, у электродвигателей до 1000 В заземлять кабельную линию медным проводником сечением не менее сечения жилы кабеля либо соединять между собой жилы кабеля и изолировать их. Такое заземление или соединение жил кабеля учитывают в оперативной документации наравне с переносным заземлением.

В электроустановках, конструкция которых делает установку заземлений опасной или невозможной, разрабатывают дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности работ, включающие установку диэлектрических колпаков на ножи разъединителей, диэлектрических накладок или отсоединение проводов, кабелей и шин. Перечень таких электроустановок после утверждения работодателем доводят до сведения персонала.

В электроустановках до 1000 В операции по установке и снятию заземлений выполняет единолично работник с группой допуска III из оперативного или оперативно-ремонтного персонала.

На воздушной линии до 1000 В достаточно установить заземление только на рабочем месте.

В электросетях до 1000 В с заземленной нейтралью при наличии повторного заземления нулевого провода допускается присоединять переносные заземления к этому нулевому проводу.

Места присоединения переносных заземлений к заземляющим проводникам или к конструкциям должны быть очищены от краски.

Переносные заземления на рабочем месте можно присоединять к заземлителю, погруженному вертикально в грунт не менее чем

на 0,5 м, установка заземлителей в случайные навалы грунта не допускается.

Порядок учета переносных заземлений в электроустановках следующей. Комплекты переносных заземлений должны быть пронумерованы и храниться в определенных местах. Специальные места для развески или укладки заземлений снабжают номерами в соответствии с номерами, имеющимися на этих комплектах. Наложение и снятие переносных заземлений, включение и отключение заземляющих ножей учитывают в оперативной или мнемонической схемах, в оперативном журнале и в наряде. Все переносные заземления учитывают по номерам с указанием мест их нахождения.

Присоединение заземляющих и нулевых защитных проводников к заземлителям, заземляющему контуру и к заземляющим конструкциям выполняют с в а р к о й, а к корпусам аппаратов, машин и опор ВЛ-сваркой или надежным болтовым соединением.

Измерение сопротивления заземляющих устройств проводят:

после монтажа, переустройства и капитального ремонта заземляющих устройств;

на подстанциях воздушных электрических сетей напряжением 35 кВ и ниже — не реже 1 раза в 6 лет;

в сетях напряжением 35 кВ и ниже у опор с разъединителями, защитными промежутками, разрядниками и у опор с повторными заземлениями нулевого провода — не реже 1 раза в 6 лет; а также выборочно у 2 % железобетонных и металлических опор в населенной местности на участках с наиболее агрессивными грунтами — не реже 1 раза в 12 лет;

в электроустановках напряжением 35 кВ и ниже, используемых только для заземления оборудования напряжением больше 1000 В, — не реже 1 раза в 6 лет;

лифтов, прачечных, бань — 1 раз в год.

Измерения проводят в периоды наибольшего высыхания грунта.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое заземление? Перечислите типы систем заземления. Дайте расшифровку каждого типа заземления. 2. Как обозначают специальные проводники? 3. Что понимают под занулением? Для чего оно служит?

2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МАШИН

2.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

2.1.1. ПОНЯТИЕ ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Современный уровень развития сельскохозяйственного производства и достижения в области науки и техники позволяют переходить от механизации и электрификации отдельных операций к *автоматизации технологических процессов (ТП)*, когда выполнение всех функций управления этими процессами или их частями осуществляют с помощью автоматических устройств. ТП характеризуется наличием операций, которые выполняются в определенной последовательности, например в ТП первичной переработки молока.

Технологические процессы в сельскохозяйственном производстве имеют ряд характерных особенностей, главная из которых — *связь технологического оборудования, технических средств с биологическими объектами (животными и растениями)*. В связи с этим при автоматизации ТП необходимы специфические датчики для съема информации с биологических объектов, не влияющие на них (датчики для контроля физиологического состояния животных и их продуктивности, температуры, влажности, освещенности растений и почвы и др.). Кроме того, регулирующие органы в составе автоматизированных систем не должны повреждать нежные и хрупкие биологические объекты (корнеплоды, фрукты, яйца и др.).

Многим технологическим процессам производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции свойственны *непрерывность и цикличность*, например при производстве молока. Поэтому их нельзя приостановить, а затем увеличить выпуск продукции за счет интенсификации процесса (как в промышленности), так как это может привести к заболеванию животных, снижению качества, порче и большим потерям продукции.

Если принять во внимание *невысокую квалификацию обслуживающего персонала*, то из вышесказанного следует, что разработка и эксплуатация средств автоматизации ТП в сельскохозяйственном производстве требует особого подхода, учитывающего отмеченные ранее особенности. Эти средства должны обладать высокой надежностью, долговечностью и простотой обслуживания.

Если автоматизированы отдельные технологические операции или установки, то такую автоматизацию считают *частичной*. Примером может служить автоматизация уборки навоза в животноводческих комплексах, когда оператор дистанционно управляет электрическим приводом навозоуборочных транспортеров. При *комплексной* автоматизации, как правило, автоматизированы все основные операции и установки, участвующие в ТП, а за оператором остается функция контроля протекания ТП. Примером может служить автоматизация послеуборочной очистки и сушки зерна на КЗС. При *полной* автоматизации автоматизированы как основные, так и вспомогательные операции и установки, связанные с выполнением ТП. За обслуживающим персоналом остаются функции периодического осмотра, профилактического ремонта и перестройки всей системы на новые режимы работы. Примером полной автоматизации можно считать систему управления микроклиматом в теплице.

Система автоматического управления (САУ) представляет собой совокупность объекта управления (ОУ) и устройства управления (УУ), взаимодействующих между собой в процессе работы для достижения определенной цели управления. *Объектом управления* могут быть производственное помещение, ТП целиком или его часть, например операция измельчения корма в ТП кормоприготовления, отдельная установка, которые для правильного выполнения своих функций нуждаются в управляющих воздействиях.

В процессе управления на ОУ воздействует ряд факторов. Для того чтобы выяснить их влияние, ОУ удобно представить в виде модели «черного ящика» (рис. 2.1), в которой скрытую внутреннюю структуру объекта исследуют по его входным и выходным сигналам. При этом технологический процесс как объект управления характеризуется следующими показателями.

1. *Выходные управляемые величины* y_1, y_2, \dots, y_n . В эту группу входят переменные параметры, которые необходимо поддерживать на заданном уровне или изменять по заданному закону.

2. *Входные регулирующие воздействия* x_1, x_2, \dots, x_m . Переменные, входящие в эту группу, используют для воздействия на объект с целью управления.

3. *Возмущающие воздействия* f , влияющие на ход ТП. В эту группу входят переменные, часть из которых можно контролировать $f_{k1}, f_{k2}, \dots, f_{kq}$, например изменение удоев молока у коров в лактационный период, а могут иметь случайный и неконтролируемый характер $f_{нк1}, f_{нк2}, \dots, f_{нкv}$ и не поддаются измерению, например поломки доильного оборудования, заболевания животных маститом. Измеренные значения $f_{k1}, f_{k2}, \dots, f_{kq}$ можно использовать для улучшения протекания ТП.

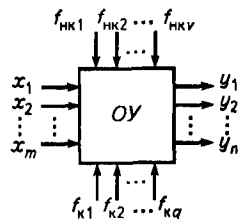


Рис. 2.1. Модель объекта управления

В ряде случаев для упрощения процесса управления выделяют главные управляемые и регулирующие параметры и используют их при создании САУ, а остальные рассматривают как второстепенные, зависящие от основных.

2.1.2. СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Любую систему автоматического управления (САУ) можно представить в виде обобщенной структурной схемы, приведенной на рисунке 2.2.

Она состоит из объекта управления (ОУ), в котором происходит подлежащий управлению процесс, и управляющего устройства (УУ), предназначенного для выполнения задачи управления этим процессом. Величину $y(t)$, которой необходимо в этом объекте управлять, называют *управляемой величиной*. Это могут быть температура в теплице, инкубаторе, частота вращения вала электродвигателя и т. д. Величину $g(t)$, значения которой должна поддерживать или воспроизводить управляемая величина, называют *задающим воздействием*. Разность между заданным и фактическим значениями управляемой величины называют *рассогласованием* или *ошибкой* системы, возникающей в результате воздействия случайных неконтролируемых факторов как на ОУ, так и на САУ в целом. К *возмущающим воздействиям* $f(t)$ можно отнести изменение температуры окружающей среды, порывы ветра, вибрацию электродвигателя и др. Управляющее устройство в соответствии с сигналом ошибки формирует *управляющее воздействие* $z(t)$ на ОУ с целью ее устранения. Таким образом, действующую в данной схеме связь выходного сигнала системы с входным, при которой отклонение выходного сигнала одного знака вызывает изменение входного сигнала противоположного знака, называют *отрицательной обратной связью*.

Более подробно процесс управления объектом можно рассмотреть по функциональной схеме (рис. 2.3), составленной из элементов и устройств автоматики и характеризующей взаимодействие этих элементов между собой.

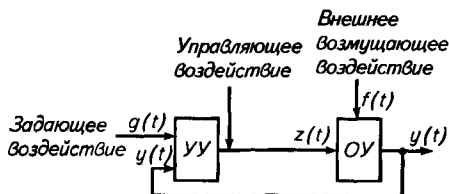


Рис. 2.2. Обобщенная структурная схема САУ

Устройство измерения (УИ) измеряет фактическое значение управляемой величины $y(t)$, которое воспринимается датчиком (Д), установленным на объекте. Сигнал с датчика поступает на информационный преобразователь (ИП), где он

преобразуется в форму, удобную для передачи и последующей обработки. Результат измерения — величина $x_1(t)$. *Задающее устройство (ЗУ)* преобразует задающее воздействие $g(t)$ в величину $x_0(t)$ той же физической природы, что и $x_1(t)$. *Устройство сравнения (УС)* производит вычитание $x_0(t) - x_1(t) = \epsilon(t)$ и тем самым выявляет рассогласование или ошибку системы $\epsilon(t)$. *Усилительно-преобразовательное устройство (УПУ)* в соответствии с заложенным в него алгоритмом управления вырабатывает сигнал управления $u(t)$, поступающий на *устройство воздействия (УВ)*, состоящее из *исполнительного устройства (ИУ)* и *регулирующего устройства (РУ)*.

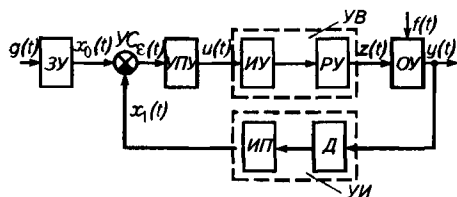


Рис. 2.3. Функциональная схема САУ

Если регулирующее устройство (задвижка, клапан и др.) в процессе воздействия на объект управления перемещается, например за счет вращения вала электродвигателя, то устройство воздействия часто называют *исполнительным механизмом (ИМ)*, а регулирующее устройство — *регулирующим органом (РО)*. В данном случае функцию исполнительного устройства, являющегося *энергетической частью* устройства воздействия, выполняет электродвигатель. Устройство воздействия формирует управляющее воздействие $z(t)$ на *ОУ*, направленное на ликвидацию рассогласования $\epsilon(t)$, независимо от причин, вызвавших это рассогласование. При этом если ошибка $\epsilon(t) = 0$, то регулирующее воздействие неизменно и САУ находится в состоянии равновесия. Например, если управляемый параметр $u(t)$ — температура в сушильной камере — соответствует заданному значению $g_0(t)$, то регулирующее устройство — поворотная заслонка на трубопроводе, через который подводится горячий воздух от исполнительного устройства (электрокалорифера), находится в определенном неподвижном состоянии.

Рассмотрим систему автоматического регулирования уровня жидкости в емкости (рис. 2.4).

Объект управления — резервуар с подводом и выпуском воды. В него через задвижку B , выполняющую функцию регулирующего органа ($РО$), идет приток жидкости $Q_{пр}$. Через отверстие в резервуаре происходит расход жидкости Q_p . Контролируемая величина y — уро-

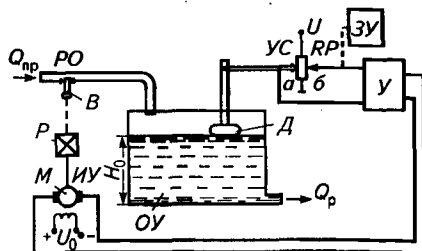


Рис. 2.4. Автоматическая система регулирования уровня жидкости в емкости

вень жидкости H — определяется поплавковым датчиком D , который вместе с ползунок a реостата RP представляет собой устройство измерения. К реостату подведено постоянное напряжение U . Сравнение текущего значения уровня H_x (сигнал x_1) и заданного значения H_0 (сигнал x_0) проводят с помощью реостата RP , выполняющего функцию устройства сравнения ($УС$) (см. рис. 2.4).

Столб жидкости воздействует на датчик, который перемещает шток, связанный с ползунок a реостата. Другой ползунок b реостата устанавливается с помощью задающего устройства ($ЗУ$), имеющего шкалу уровня g , в положение, соответствующее заданному значению уровня H_0 . Напряжение, снимаемое с реостата RP между точками a и b , представляет собой сигнал ошибки ϵ : $\Delta U = k(H_0 - H_x)$, где k — коэффициент пропорциональности. Оно подается на усилитель ($У$), выполняющий функцию усилительно-преобразовательного устройства ($УПУ$). Усиленный сигнал U поступает на исполнительный механизм, состоящий из электродвигателя постоянного тока M с редуктором P и задвижки B . В результате на выходе исполнительного механизма вырабатывается управляющее воздействие на ОУ [сигнал $z(t)$]. В этом регуляторе двигатель M с редуктором P выполняют функцию исполнительного устройства.

Если $H_0 - H_x < 0$, то сигнал ΔU с устройства сравнения через усилитель поступает на двигатель M , в результате чего задвижка (регулирующий орган) перемещается в сторону уменьшения подачи воды. Если же $H_0 - H_x > 0$, то сигнал ΔU изменяет направление вращения вала двигателя M , что ведет к большему открытию задвижки. Воздействие регулирующего органа осуществляется до тех пор, пока не установится равенство $H_0 = H_x$. При этом в системе наступит равновесие: приток жидкости будет равен расходу. Этому режиму соответствует уровень H_0 , который остается постоянным.

2.1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ САУ

В современном сельскохозяйственном производстве нашли применение различные САУ. Приведем их классификацию.

1. Классификация по принципу управления.

Основные *принципы управления*, которые реализуются в САУ, — это принципы управления по отклонению, по возмущению и комбинированный.

Управление по отклонению основано на определении отклонения управляемой величины от заданного значения и преобразовании его в управляющее воздействие, направленное на устранение этого отклонения (см. рис. 2.3). САУ, работающие по этому принципу, называют *замкнутыми*. Преимущества таких САУ — высокая точность управления независимо от причин, вызвавших изменение управляемой величины. Однако быстродействие таких САУ сравнительно низкое. Это связано с тем, что требуется опре-

деленное время после приложения входного воздействия, чтобы устройство управления приступило к формированию управляющего воздействия на уже произошедшее отклонение управляемой величины. Примером принципа управления по отклонению может служить рассмотренный выше автоматический регулятор уровня воды в резервуаре (см. рис. 2.4). В более 80 % всех САУ использован данный принцип управления.

Управление по возмущению основано на определении с помощью устройства измерения УИ основного возмущающего воздействия $f(t)$ (рис. 2.5) и формировании усилительно-преобразовательным устройством воздействия $u(t)$, направленного на компенсацию (ослабление) этого влияния.

В данном случае САУ непосредственно реагирует на причину, вызывающую изменение управляемой величины, поэтому ее быстрое действие выше, поскольку отрицательное влияние воздействия $f(t)$ может быть устранено до того, как произойдет отклонение управляемой величины. Однако в связи с тем что САУ *разомкнута* [датчик реагирует не на управляемую величину $y(t)$, а на воздействие $f(t)$], точность управления снижается. В качестве примера можно привести САУ температурой в помещении, когда датчик контролирует температуру наружного воздуха, являющуюся основной причиной изменения температуры внутри помещения.

Комбинированный принцип управления объединяет принципы управления по отклонению и возмущению. САУ, работающие по данному принципу, обладают преимуществами того и другого принципов. Пример таких САУ — система управления температурным режимом в помещении с использованием двух контуров управления, имеющих датчики температуры воздуха, расположенные как внутри помещения, так и снаружи.

2. Классификация по закону изменения во времени выходного сигнала $x_0(t)$ задающего устройства (см. рис. 2.3) (по алгоритму функционирования).

Стабилизирующие САУ. Отличительный признак этого типа систем — постоянная во времени величина выходного сигнала задающего устройства $x_0(t) = \text{const}$. *Стабилизация* какого-либо параметра, т. е. поддержание заданного значения управляемой величины $y(t)$ при изменяющихся возмущающих воздействиях $f(t)$ (стабилизация температуры, давления, напряжения и т. п.), — наиболее распространенная задача, решаемая САУ. При этом процесс управления называют *регулированием*, объект управления — *объектом регулирования*, управляющее устройство таких систем — *автоматическим регулятором*, а сами системы — *системами автоматического регулирования (САР)*. В ста-

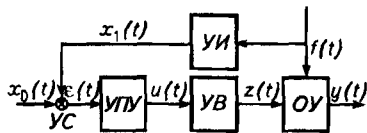


Рис. 2.5. Функциональная схема САУ с управлением по возмущению

билизирующих САУ, как правило, используют принцип управления по отклонению.

3. Классификация по закону изменения во времени выходного сигнала автоматического регулятора [сигнала $u(t)$ на выходе усилительно-преобразовательного устройства на рис. 2.3].

По этому признаку САУ могут быть непрерывного и дискретного действий (импульсного, цифрового и позиционного).

4. Классификация по изменению выходной величины u от внешнего воздействия f в установившемся режиме.

По этому признаку САУ подразделяют на статические и астатические. В *статических* САУ статическая ошибка зависит от возмущающего воздействия, а в *астатических* она равна нулю. Другими словами, в астатических САУ значение регулируемой величины не зависит от положения регулирующего устройства.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие особенности имеют технологические процессы в сельскохозяйственном производстве? 2. Дайте определение системы автоматического управления (САУ). 3. Поясните основные принципы управления, которые реализуются в САУ. 4. Какие факторы воздействуют на объект управления в процессе работы автоматической системы? 5. Опишите процесс управления с использованием структурной и функциональной схем. 6. Опишите функции, выполняемые элементами функциональной схемы систем автоматики. 7. Приведите классификацию систем автоматического управления.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Поскольку ТП, подлежащие автоматизации в сельскохозяйственном производстве, достаточно сложны, создание для них САУ невозможно без моделирования. *Моделирование* предполагает исследование вместо реальных сложных процессов и систем, более простых для понимания и описания физических и математических моделей. *Модель* отображает определенные характеристики системы, существенные для решения поставленной задачи.

Исследование элементов и САУ в целях идентификации можно проводить аналитическими и экспериментальными методами. Хотя модель, полученная аналитически, полнее отражает внешние и внутренние связи в ОУ, она достаточно приближенная, поскольку содержит ряд допущений и ограничений, принимаемых при ее создании. Преимущество экспериментальных моделей заключается в том, что они требуют минимальных сведений о процессах, протекающих в ОУ и, как правило, обеспечивают точность, достаточную для инженерных расчетов, в том числе с использованием компьютерной техники. При этом для исследования динамических режимов работы САУ и ее элементов можно использовать такие программы, как MathCad, PSpice и др.

Рассмотрим методы описания САУ.

2.2.1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Статическая характеристика — зависимость выходной величины y элемента или системы от входной x в установившемся режиме. При одной входной величине эту зависимость записывают в виде $y = f(x)$.

Метод осреднения используют в том случае, когда достаточно гладкая нелинейная характеристика 1 (рис. 2.6, а) не может быть аппроксимирована аналитической функцией. В этом случае ее заменяют прямой линией 2.

Метод малых отклонений основан на замене нелинейной характеристики $y(x)$ в окрестности рабочей точки O с координатами (x_0, y_0) прямой линией, касательной к этой точке (рис. 2.6, б). Рабочую точку O выбирают в середине рабочего диапазона Δx . Если же нелинейная статическая характеристика задана аналитически, то ее линеаризацию проводят разложением в ряд Тейлора в окрестности выбранной точки, оставляя в этом разложении только линейную часть.

Встречаются и существенно нелинейные статические характеристики: с зоной насыщения (рис. 2.7, а) и с зоной нечувствительности

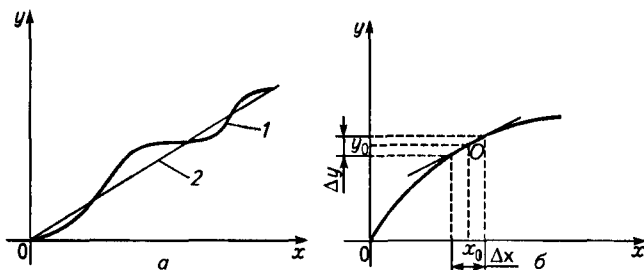


Рис. 2.6. Методы линеаризации статических характеристик:
а — метод осреднения; б — метод малых отклонений

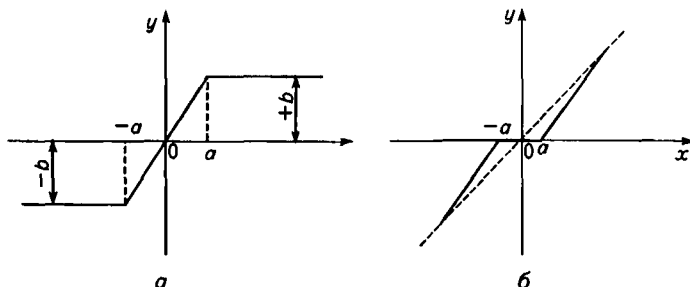


Рис. 2.7. Статические характеристики элементов и систем:
а — с зоной насыщения; б — с зоной нечувствительности

сти (рис. 2.7, б), а также характеристики *релейного* типа. В первом случае при $x > a$ и $x < -a$ выходная величина y постоянна и принимает значения $y = \pm b$. Такие характеристики имеют, например, электронные усилители.

Во втором случае выходной сигнал y начинает изменяться только при $x > a$ и $x < -a$, а при $|x| \leq a$ $y = 0$. Отрезок от $-a$ до $+a$ называют *зоной нечувствительности*. Если зона нечувствительности мала и ею можно пренебречь (например, при больших по модулю значениях входной величины x), то статическая характеристика может быть линеаризована (пунктирная линия на рис. 2.7, б). Зона нечувствительности в таких элементах автоматики, как реле, тахогенераторы, редукторы, электродвигатели и др., возникает из-за наличия люфта, трения и других причин.

Элементы и системы автоматики в статическом режиме характеризуются *коэффициентом передачи*. Это отношение дифференциала выходного сигнала dy к дифференциалу входного сигнала dx , получаемое дифференцированием аналитического выражения статической характеристики: $k = dy/dx$. Коэффициент передачи приблизительно можно найти по статической характеристике (см. рис. 2.6, б). Это отношение приращения выходной величины Δy к приращению входной величины Δx в окрестности выбранной рабочей точки O : $k = \Delta y/\Delta x$. Коэффициент передачи датчиков принято называть *коэффициентом чувствительности*, усилителей — *коэффициентом усиления*.

2.2.2. ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Динамический режим работы САР и ее элементов характеризуется *динамическими характеристиками*, отражающими связь между входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ величинами, изменяющимися во времени. Для описания динамических режимов работы элементов автоматики и САР используют дифференциальные уравнения, передаточные функции, переходные и частотные характеристики.

Математическая модель элемента системы, называемая *звеном* системы, может быть *линейной*, когда входная и выходная величины связаны линейной зависимостью, и *нелинейной*, для описания которой используют нелинейные уравнения. Звено системы называют *стационарным*, если его реакция не зависит от времени приложения входного воздействия.

Так как входные воздействия по своему характеру и величине могут быть разными, то и решение одного и того же уравнения будет различным. Поэтому для сравнения динамических свойств различных элементов рассматривают их переходные процессы при *нулевых* начальных условиях и *типовых* входных воздействиях.

Под *начальными условиями* понимают значения выходной вели-

чины и всех ее производных в момент $t = t_0$ при условии, что до этого времени внешние воздействия отсутствовали. Начальные условия называют *нулевыми*, если при $t = 0$ $y(0) = 0$ и все производные $y'(0) = y''(0) \dots y^n(0) = 0$.

В качестве *типовых* входных воздействий принимают простые для реализации и математического описания воздействия. К ним относят воздействия, описываемые ступенчатой, импульсной и гармонической функциями.

Временные характеристики. Типовое воздействие в виде *единичной ступенчатой функции (единичного скачка)*

$$l(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Реакцию звена или системы на единичную ступенчатую функцию при нулевых начальных условиях называют *переходной функцией $h(t)$* . Графическое изображение переходной функции называют *переходной характеристикой* системы или звена. Ступенчатое *не единичное* входное воздействие, в k раз большее единицы, имеет вид $k \cdot l(t)$. Экспериментально снятая переходная характеристика при таком воздействии носит название *кривой разгона*. Единичное ступенчатое воздействие $x(t)$ и примеры переходных характеристик показаны на рисунке 2.8, *а*, где $h_{уст}$ — установившееся значение переходной функции, к которому стремятся кривые колебательного 1 и аperiodического 2 переходных процессов.

Наряду с единичной ступенчатой функцией применяют и входное воздействие в виде кратковременного импульса большой амплитуды. В результате такого воздействия получают *импульсную переходную функцию $\omega(t)$* . На рисунке 2.8, *б* приведены импульсное

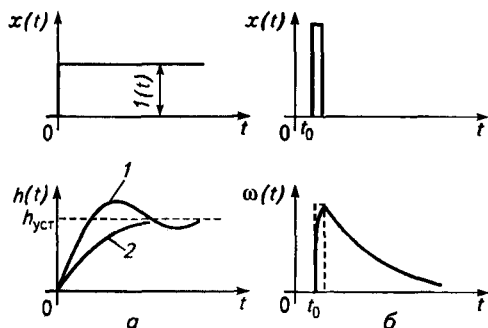


Рис. 2.8. Графики ступенчатого $x(t)$ (а) и импульсного $x(t)$ (б) воздействий и примеры переходных характеристик $h(t)$ (а) и импульсной переходной характеристики $\omega(t)$ (б):

1 — колебательный процесс; 2 — аperiodический процесс

воздействие $x(t)$ в момент t_0 и графическое изображение функции $\omega(t)$, называемой *импульсной переходной характеристикой*.

Переходную и импульсную переходную характеристики относят к временным характеристикам звена или системы. Так как временные характеристики можно получить не только путем решения дифференциального уравнения системы, но и экспериментально, то это упрощает определение динамических свойств системы. Поэтому они нашли широкое применение при исследовании САУ.

Нахождение дифференциального уравнения САУ и его решение в общем случае — сложная задача. Описание элементов и систем автоматики существенно упрощается при использовании методов *операционного исчисления*, а именно *преобразования Лапласа*.

Сущность этого преобразования заключается в том, что вместо переменной $x(t)$ рассматривают однозначно соответствующую ей переменную $X(p)$, где p — комплексная переменная, называемая *оператором*. В операционном исчислении функцию времени $x(t)$ называют *оригиналом* функции $X(p)$, а функцию $X(p)$ — *изображением* функции $x(t)$. Операцию перехода от оригинала $x(t)$ к ее изображению $X(p)$ называют *прямым преобразованием Лапласа*, а операцию перехода от изображения $X(p)$ к оригиналу $x(t)$, или нахождение оригинала по изображению, — *обратным преобразованием Лапласа*.

Прямое преобразование Лапласа позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим, так как операцию дифференцирования оригиналов при нулевых начальных условиях dx/dt , dx^2/dt^2 , ..., dx^n/dt^n заменяют операцией умножения изображения $X(p)$ на оператор p в соответствующей степени, т. е. $pX(p)$, $p^2X(p)$, ..., $p^nX(p)$; операцию интегрирования $\int xdt$ заменяют операцией деления изображения на оператор p , т. е. $X(p)/p$.

Рассмотрим для примера дифференциальное уравнение второго порядка звена САУ

$$T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (2.1)$$

где T — постоянная времени, ξ — постоянный коэффициент; k — коэффициент передачи звена.

Применив к уравнению прямое преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим алгебраическое уравнение

$$(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) Y(p) = kX(p). \quad (2.2)$$

В преобразованных по Лапласу уравнениях можно проводить различные алгебраические действия: умножение, деление, возве-

дение в степень, вынесение за скобки и т. д. После выполнения необходимых вычислений с изображениями (решив алгебраическое уравнение) при помощи специальных таблиц, приводимых в литературе по автоматике, переходят обратно от изображений к оригиналам и получают искомым результат — функцию $y(t)$.

Передаточная функция. Большое значение при оценке динамических свойств элементов и систем автоматики имеет *передаточная функция*. Это отношение изображения выходной величины системы $Y(p)$ к изображению ее входной величины $X(p)$ при нулевых начальных условиях

$$W(p) = Y(p)/X(p). \quad (2.3)$$

Передаточная функция, по существу, — особая форма записи дифференциального уравнения, ее широко используют при анализе и синтезе САУ. Найдем, например, передаточную функцию для уравнения (2.2):

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}. \quad (2.4)$$

Знаменатель передаточной функции называют *характеристическим полиномом*, а если приравнять знаменатель нулю, получим *характеристическое уравнение*.

Частотные характеристики. Кроме временных характеристик и передаточных функций для оценки динамических свойств элементов и систем в автоматике применяют *частотные характеристики*. Для этого в качестве *типového входного воздействия* используют *синусоидальный (гармонический) сигнал* с постоянной амплитудой $A_{вх}$ и частотой ω

$$x(t) = A_{вх}(\omega)\sin(\omega t + \varphi_{вх}) = A_{вх}(\omega)e^{j(\omega t + \varphi_{вх})}.$$

Если статические характеристики линейны, то на выходе звена или системы после окончания переходных процессов также устанавливаются синусоидальные колебания той же круговой частоты ω , что и входные колебания, но амплитуда $A_{вых}$ изменяется и возникает сдвиг выходных колебаний по фазе на угол $\varphi_{вых}$ относительно входных, имеющих начальную фазу $\varphi_{вх}$:

$$y(t) = A_{вых}(\omega)\sin(\omega t + \varphi_{вых}) = A_{вых}(\omega)e^{j(\omega t + \varphi_{вых})}.$$

Отношение выходной величины к входной, выраженное в комплексной форме, называют *амплитудно-фазочастотной характеристикой (АФЧХ)*, или *комплексной частотной характеристикой*

тикой (КЧХ),

$$W(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}(\omega) e^{j(\omega t + \varphi_{\text{ВЫХ}})}}{A_{\text{ВХ}}(\omega) e^{j(\omega t + \varphi_{\text{ВХ}})}} = W(\omega) e^{j(\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}})}, \quad (2.5)$$

где $W(\omega) = A_{\text{ВЫХ}}(\omega)/A_{\text{ВХ}}(\omega)$ — модуль АФЧХ, представляет собой *амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)*, т. е. выражает зависимость отношения амплитуд выходных и входных колебаний от частоты, а $\varphi(\omega) = \varphi_{\text{ВЫХ}}(\omega) - \varphi_{\text{ВХ}}(\omega)$ — аргумент АФЧХ, представляет собой *фазочастотную характеристику (ФЧХ)*, выражает зависимость разности фаз выходных и входных колебаний от частоты.

АФЧХ системы или звена не зависит от времени, а отображает одновременно зависимость отношения амплитуд и сдвига фаз от частоты ω . В отличие от временных характеристик частотные характеристики выражают зависимость параметров *установившихся* выходных колебаний от тех же параметров входных колебаний при различных частотах. Вместе с тем АФЧХ, как и временные характеристики или дифференциальные уравнения, определяют динамические свойства системы.

АФЧХ можно также получить, подставляя в выражение передаточной функции (2.3) вместо p выражение $j\omega$. Тогда в алгебраической форме записи функция $W(j\omega)$ может быть представлена в виде:

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega), \quad (2.6)$$

где $\text{Re}(\omega)$ — проекция вектора $W(j\omega)$ на действительную ось комплексной плоскости; $\text{Im}(\omega)$ — проекция вектора $W(j\omega)$ на мнимую ось.

Значения $W(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ находят из следующих формул:

$$W(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}; \quad (2.7)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}. \quad (2.8)$$

Геометрически АФЧХ — это линия (годограф), которую описывает вектор $W(j\omega)$ при изменении частоты $0 \leq \omega \leq \infty$. АФЧХ можно строить по модулю $W(\omega)$ и аргументу $\varphi(\omega)$ для каждого значения частоты ω , а также откладывая в прямоугольной системе координат по оси абсцисс действительную часть $\text{Re}(\omega)$, а по оси ординат — мнимую часть $\text{Im}(\omega)$. На графике АФЧХ отмечают частоты, при которых построены векторы данной характеристики и стрелкой указывают направление возрастания частоты (частотные характеристики см. на рис. 2.12).

В инженерных расчетах частотные характеристики удобно строить в логарифмическом масштабе. Это связано с тем, что при переходе к логарифмам операцию умножения передаточных характеристик звеньев заменяют более простой операцией сложения

Рис. 2.9. Система координат для построения логарифмических частотных характеристик:

$L(\omega)$ — ЛАЧХ; $\varphi(\omega)$ — ЛФЧХ

их логарифмов. При этом для нахождения результирующей передаточной характеристики системы можно складывать графически характеристики отдельных звеньев.

Перед построением логарифмических характеристик логарифмируют исходное выражение $W(j\omega)$ (2.5) и для построения используют его модуль $\lg W(\omega)$:

$$\lg W(j\omega) = \lg W(\omega) + j\varphi(\omega)\lg e. \quad (2.9)$$

За единицу усиления или ослабления мощности сигнала, проходящего через какое-либо звено или устройство, принят б е л (Б): десятичный логарифм отношения выходной мощности сигнала $P_{\text{вых}}$ к его входной мощности $P_{\text{вх}}$, т. е. $\lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})$. Например, усиление мощности сигнала в 100 раз равно 2Б. Так как бел — достаточно крупная единица измерения, то в практике за единицу измерения степени усиления или ослабления сигнала принята в 10 раз меньшая единица — децибел (дБ): 1 дБ = 0,1 Б.

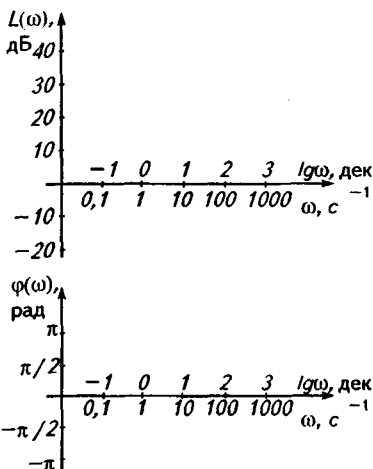
В автоматике чаще пользуются амплитудами сигналов, чем мощностями. С учетом того, что мощность сигнала P прямо пропорциональна квадрату его амплитуды A , величину логарифма амплитудно-частотной характеристики, выраженную в децибелах, можно записать в виде

$$L(\omega) = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} \right)^2 = 20 \lg W(\omega). \quad (2.10)$$

Зависимость (2.10) называют *логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ)*.

Фазочастотная характеристика $\varphi(\omega)$, построенная в полулогарифмическом масштабе, в виде зависимости угла φ в градусах или радианах от $\lg \omega$ носит название *логарифмической фазочастотной характеристики (ЛФЧХ)*.

За единицу измерения частоты сигнала принимают декаду. Это интервал частот, на котором частота сигнала изменяется в 10 раз. Используют также и о к т а в у, соответствующую изменению частоты сигнала в 2 раза. В логарифмическом масштабе частот ω отрезки в одну декаду или октаву, отложенные на оси абсцисс, по-



стоянны и соответственно равны:

$$\begin{aligned}\lg 10\omega - \lg \omega &= \lg 10 + \lg \omega - \lg \omega = \lg 10 = 1; \\ \lg 2\omega - \lg \omega &= \lg 2 + \lg \omega - \lg \omega = \lg 2 \approx 0,3.\end{aligned}$$

При построении ЛАЧХ по оси ординат откладывают логарифмическую амплитуду в децибелах $L(\omega) = 20 \lg W(\omega)$, а по оси абсцисс угловую частоту ω в рад/с (с^{-1}) или в $\lg \omega$ (декадах) (рис. 2.9).

Нуль логарифмической амплитуды соответствует $W(p) = 1$ (усиление сигнала равно единице), так как $\lg 1 = 0$. Если $W(p) < 1$ (выходная амплитуда меньше входной, что соответствует ослаблению сигнала), то значения ЛАЧХ находятся под осью абсцисс.

В логарифмическом масштабе точка, соответствующая $\omega = 0$, находится слева — в минус бесконечности ($\lg 0 = -\infty$). Поэтому логарифмические характеристики строят не от частоты $\omega = 0$, а проводят ось ординат так, чтобы она пересекала ось абсцисс в точке, справа от которой лежит исследуемый диапазон частот.

ЛФЧХ строят в системе координат с такой же осью абсцисс, что и у ЛАЧХ, а по оси ординат в линейном масштабе откладывают угол $\varphi(\omega)$ в градусах или в радианах. ЛФЧХ строят обычно под ЛАЧХ для того, чтобы можно было сопоставить изменение фазы с изменением амплитуды при одинаковых частотах (примеры логарифмических характеристик см. на рис. 2.12, в).

2.2.3. ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ САР

Для изучения динамических режимов САР ее разделяют на отдельные элементы, отличающиеся друг от друга динамическими характеристиками. Элементы автоматической системы, описываемые дифференциальными уравнениями не выше второго порядка, называют еще *типовыми динамическими звеньями*. Тип звена не зависит от физической природы элемента.

К числу основных типовых динамических звеньев относят пропорциональное (статическое, безынерционное, усилительное), интегрирующее, дифференцирующее, апериодическое первого и второго порядка, колебательное, консервативное и запаздывающее.

Пропорциональное звено. Передаточная функция *пропорционального звена* имеет вид $W(p) = k$, где k — коэффициент передачи (усиления), а переходная характеристика $h(t)$ при единичном входном воздействии $1(t)$ показана на рисунке 2.10, а.

Пропорциональное звено мгновенно (без инерции) реагирует на возмущающее воздействие. Примерами таких звеньев могут служить электронный усилитель, редуктор, рычажная передача без трения и зазоров, переменный резистор, преобразующий механическое перемещение ползунка в электрическое напряжение и

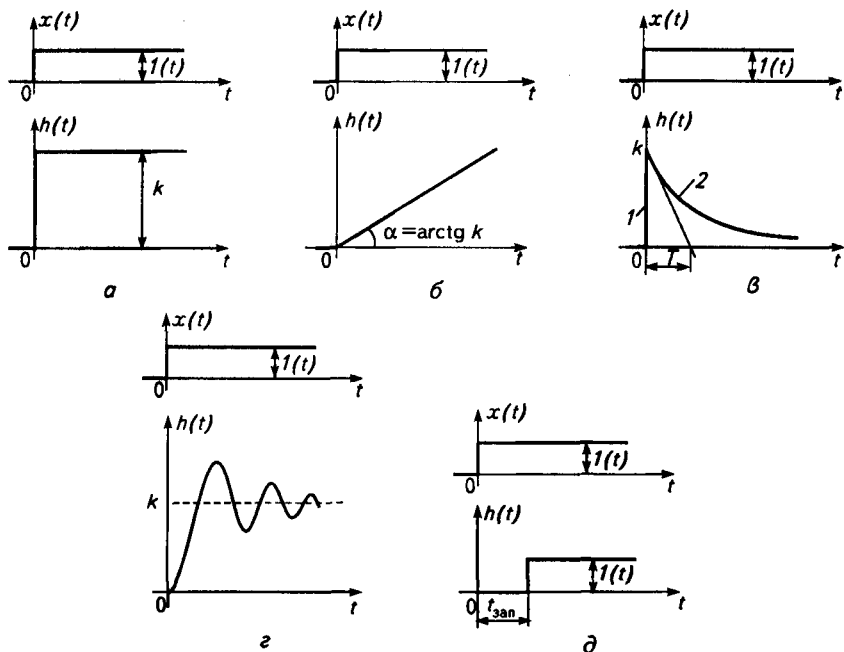


Рис. 2.10. Переходные характеристики типовых звеньев при единичном входном воздействии:

a — пропорциональное звено; *б* — интегрирующее звено; *в* — дифференцирующее звено; *г* — колебательное звено; *д* — запаздывающее звено

другие элементы, в которых переходными процессами можно пренебречь.

Интегрирующее звено. Его также называют астатическим, оно имеет передаточную функцию вида $W(p) = k/p$. Переходная характеристика приведена на рис. 2.10, б. Примерами интегрирующих звеньев могут служить цепь с электрическим конденсатором C , если за входную величину принять ток i , а за выходную — напряжение на конденсаторе $u_{\text{вых}}$ (рис. 2.11, а), причем значение $R \rightarrow 0$; бункер-накопитель; резервуар с водой, которую откачивают насосом, имеющим постоянную подачу (см. рис. 2.14, б).

Дифференцирующее звено. Идеальное дифференцирующее звено имеет передаточную функцию вида $W(p) = kp$ и переходную характеристику, представленную на рис. 2.10, в (кривая 1). Передаточная функция реального дифференцирующего звена $W(p) = kp/(Tp + 1)$ и его переходная характеристика представлены на рисунке 2.10, в (кривая 2), где k — коэффициент передачи; T — постоянная времени, характеризующая инерционные свойства звена. Как видно из

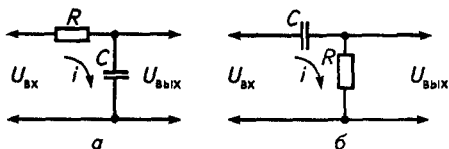


Рис. 2.11. Схемы RC -цепей:

а — аperiодического звена первого порядка;
б — дифференцирующего звена

При этом напряжение $U_{\text{вх}}$ — входная величина, а ток i — выходная величина. В реальном дифференцирующем звене на основе RC -цепи сопротивление $R \neq 0$. При уменьшении величины T переходная характеристика приближается к характеристике идеального дифференцирующего звена (кривая 1 на рис. 2.10, *в*). Примером дифференцирующего звена может служить тахогенератор, вырабатывающий напряжение $u_{\text{вых}}$, пропорциональное угловой скорости $\omega = d\beta_{\text{вх}}/dt$ вращения якоря, т. е. $u_{\text{вых}} = k\omega$, где $\beta_{\text{вх}}$ — угол поворота якоря.

Аperiодическое звено первого порядка. Его описывают дифференциальным уравнением вида

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (2.11)$$

где так же, как и в предыдущем звене, T — постоянная времени, а k — коэффициент передачи.

Перейдя к изображениям, получим $TrY(p) + Y(p) = kX(p)$. Тогда передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{Tp+1}. \quad (2.12)$$

Выходная величина $y(t)$ при скачкообразном изменении входного воздействия изменяется по экспоненте, стремясь к установившемуся значению (см. рис. 2.15). Примерами таких звеньев могут служить RC -цепь (см. рис. 2.11, *а*), термopара, электродвигатель, который после включения в электрическую сеть набирает обороты по экспоненте, бак с водой, заполняемый сверху, вода из которого вытекает свободным потоком (см. рис. 2.14, *а*). Поскольку данное типовое динамическое звено наиболее часто используют в автоматике, остановимся на нем подробнее.

Рассмотрим пример построения частотных характеристик для аperiодического звена первого порядка.

Для получения АФЧХ подставим в уравнение (2.12) выражение $p = j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega+1}. \quad (2.13)$$

Избавляясь от j в знаменателе умножением и делением выражения (2.13) на комплексно сопряженное число $(1 - Tj\omega)$, получим

$$W(j\omega) = \frac{k(1 - j\omega T)}{1 + T^2\omega^2}.$$

Разделим уравнение на две части: действительную и мнимую (без j и s)

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{k\omega T}{1 + T^2\omega^2}.$$

Используя соотношения (2.7) и (2.8), найдем из последнего выражения модуль и аргумент АФЧХ

$$W(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \quad (2.14)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(T\omega). \quad (2.15)$$

По полученным формулам строим АЧХ и ФЧХ (рис. 2.12, а) и АФЧХ (рис. 2.12, б).

Задаваясь различными значениями угловой частоты: $0 \leq \omega \leq \infty$, находим для каждой частоты значения АФЧХ. Частоту $\omega_{\text{сп}} = 1/T$ называют *частотой сопряжения* или *сопрягающей частотой*. Вычисленные значения для характерных точек АФЧХ представлены в таблице 2.1.

2.1. Результаты расчета значений частотных характеристик

ω	$W(\omega)$	$\varphi(\omega)$	$\text{Re}(\omega)$	$\text{Im}(\omega)$	Длина вектора
0	k	0	k	0	k
$1/T$	$k/\sqrt{2}$	-45°	$0,5k$	$-0,5k$	$k/\sqrt{2}$
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow -90^\circ$	0	0	0

Из построения видим, что график АФЧХ представляет собой полуокружность радиусом $k/2$, центр которой расположен на положительной полуоси в точке с координатами $(k/2, 0)$. АЧХ и ФЧХ строят для тех же частот.

Построим далее ЛАЧХ и ЛФЧХ аperiodического звена первого порядка (рис. 2.12, в). Прологарифмируем модуль АФЧХ выражения (2.14) и получим:

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}} = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 + T^2\omega^2}. \quad (2.16)$$

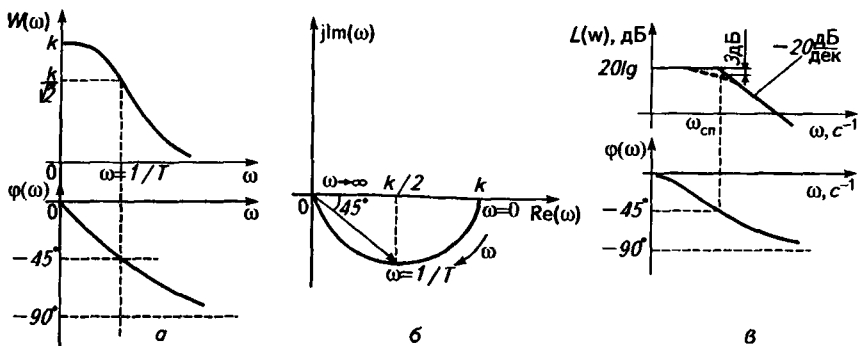


Рис. 2.12. Частотные характеристики аperiodического звена первого порядка:

а — $M(\omega)$ — АЧХ и $\varphi(\omega)$ — ФЧХ; б — $M(j\omega)$ — АФЧХ; в — логарифмические: $L(\omega)$ — ЛАЧХ; $\varphi(\omega)$ — ЛФЧХ

Проанализируем это выражение. Оно состоит из двух частей. Первая часть — постоянная величина, не зависящая от частоты, а вторая часть зависит от частоты. Чтобы упростить построения, пользуются *асимптотическими* ЛАЧХ. Для рассматриваемого звена ЛАЧХ состоит из двух асимптот (двух прямых линий), пересекающихся в точке, которая соответствует частоте сопряжения $\omega_{\text{сн}} = 1/T$.

Разделим весь диапазон частот на два участка.

На участке $0 \leq \omega \leq 1/T$ при $\omega \rightarrow 0$ вторая часть формулы (2.16): $-20 \lg \sqrt{1+T^2\omega^2} = -20 \lg 1 = 0$, и $L(\omega) = 20 \lg k$. На втором участке, справа от $\omega_{\text{сн}}$: $1/T \leq \omega \leq \infty$ при $\omega \rightarrow \infty$, единицей под корнем рассматриваемого выражения можно пренебречь. Тогда

$$L(\omega) = -20 \lg \sqrt{T^2\omega^2} \cong -\lg \omega T \rightarrow -\infty. \quad (2.17)$$

Оценим в дБ уменьшение (наклон) ЛАЧХ при изменении частоты ω на одну декаду. Для этого подставим в формулу (2.17) значения частот, отличающихся в 10 раз, а именно: 10ω и ω

$$-20 \lg \sqrt{1+T^2\omega^2} \cong -20 \lg \omega T = -20 \lg 10\omega T - 20 \lg \omega T = -20 \lg 10 = -20 \text{ дБ}.$$

Таким образом, при изменении частоты в 10 раз логарифмическая амплитуда $L(\omega)$ уменьшилась на 20 дБ, т. е. наклон ЛАЧХ для рассматриваемого звена составляет -20 дБ/дека. Несовпадение асимптотической и реальной ЛАЧХ на частоте сопряжения $\omega_{\text{сн}} = 1/T$ составляет -3 дБ, т. е. реальная логарифмическая амплитуда на 3 дБ ниже асимптоты $20 \lg k$.

ЛФЧХ строят, используя уравнение $\varphi(\omega) = -\arctg \omega T$, по нескольким характерным точкам. При $\omega \rightarrow 0$ значение $\varphi(\omega)$ стремится

ся к прямой $\varphi(\omega) = 0$; на частоте сопряжения $\varphi(\omega) = -\arctg(1/T) T = -\arctg 1 = -45^\circ$; а при $\omega \rightarrow \infty$ $\varphi(\omega)$ стремится к прямой $\varphi(\omega) = -90^\circ$.

Колебательное, консервативное и аperiodическое звено второго порядка. Связь между входной и выходной величинами этих звеньев определяют одним и тем же дифференциальным уравнением (2.1), где k — статический коэффициент передачи звена, равный отношению установившихся значений выходной и входной величин; ξ — коэффициент относительного затухания или степень успокоения. Характер изменения во времени выходной величины у для данного звена зависит от величины коэффициента ξ . При $0 < \xi < 1$ звено становится *колебательным*. Его переходная характеристика приведена на рисунке 2.10, г. С уменьшением коэффициента ξ интенсивность колебаний увеличивается, и при $\xi = 0$ они становятся незатухающими (см. рис. 2.23, г). Это звено — частный случай колебательного звена, его называют *консервативным звеном*. Передаточную функцию звена получают при подстановке в формулу (2.1) значения $\xi = 0$

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 1}.$$

Если $\xi < 0$, то получают *неустойчивое колебательное звено*, когда амплитуда колебаний на выходе звена с течением времени возрастает (см. рис. 2.23, в).

При увеличении коэффициента ξ интенсивность колебаний на выходе звена уменьшается, а при $\xi \geq 1$ переходный процесс из колебательного переходит в аperiodический (кривая 1 на рис. 2.19), что соответствует *аperiodическому звену второго порядка*.

Примерами устойчивого колебательного звена могут служить: механическая система в виде груза, подвешенного на пружине, при наличии в этой системе успокоительного устройства; пружинные весы; параллельный или последовательный электрический колебательный контур, содержащий емкость, индуктивность и активное сопротивление. Пример консервативного звена — колебательный контур, в котором отсутствует активное сопротивление (идеальный контур). Аperiodическими звеньями второго порядка считают нагревательные и охлаждающие установки, теплицы и животноводческие помещения.

Запаздывающее звено. Оно характеризуется тем, что выходная величина повторяет входную, но с некоторым постоянным запаздыванием $t_{\text{зап}}$ (рис. 2.10, д). Это запаздывание транспортное. Передаточная функция звена имеет вид

$$W(p) = e^{-p t_{\text{зап}}}. \quad (2.18)$$

Свойствами такого звена обладают транспортеры, трубопроводы, запоминающие устройства на магнитных носителях, реле и др.

2.2.4. СОЕДИНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ САР

При исследовании САР ее удобно представлять в виде *структурной динамической схемы*, состоящей из типовых звеньев, соединенных между собой определенным образом. Структурные динамические схемы — это графические представления математической модели системы. Зная динамические характеристики отдельных звеньев, входящих в структурную схему, можно определить динамические характеристики всей САР.

Отдельные звенья на структурной динамической схеме условно обозначают в виде прямоугольника, внутри которого записывают выражение передаточной функции данного звена, а входные и выходные сигналы указывают в операторной форме (рис. 2.13). Устройство сравнения изображают в виде круга, разделенного на секторы. Вход, на который подается вычитаемая величина, указывают на схеме знаком «-», или сектор круга на условном графическом изображении зачерняют (рис. 2.13, в и г). Структурная схема отражает последовательность прохождения сигналов и взаимные связи в системе.

САР любой сложности можно рассматривать как совокупность трех видов соединений звеньев: последовательного, параллельного и встречно-параллельного или соединения с обратной связью.

При *последовательном соединении* n звеньев выходная величина предшествующего звена — это входное воздействие для последующего звена (рис. 2.13, а). Для упрощения структурной схемы последовательно соединенные звенья можно заменить одним звеном с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев, входящих в систему. При этом ре-

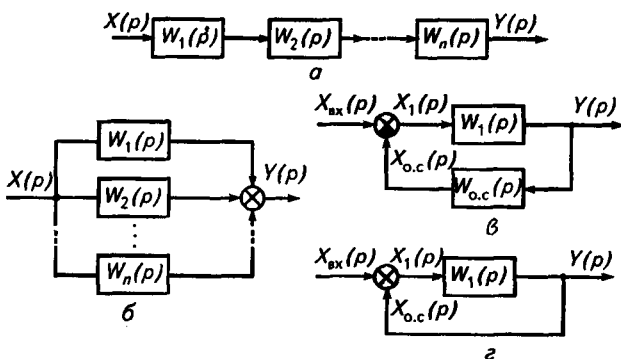


Рис. 2.13. Соединение динамических звеньев:

а — последовательное соединение; б — параллельное соединение; в — соединение звеньев с ОС при $W_{о.с}(p) \neq 1$; г — соединение звеньев с ОС при $W_{о.с}(p) = 1$

зультат последовательного соединения не зависит от порядка соединения звеньев

$$W_{\text{посл}}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.19)$$

При *параллельном* соединении n звеньев (рис. 2.13, б) на вход всех звеньев подается одно и то же воздействие, а выходные величины суммируются. Как и в предыдущем случае, цепь из параллельно соединенных звеньев можно заменить одним звеном с передаточной функцией, равной алгебраической сумме передаточных функций входящих в нее звеньев

$$W_{\text{пар}}(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.20)$$

Встречно-параллельное соединение звеньев или соединение с *обратной связью*. Принято считать, что звено охвачено обратной связью, если его выходной сигнал через какое-либо другое звено подается на вход рассматриваемого звена (см. рис. 2.13, в). При этом если сигнал обратной связи $X_{o.c.}(p)$ вычитается из входного воздействия $X_{вх.}(p)$, т. е. $X_1 = X_{вх.}(p) - X_{o.c.}(p)$, то обратную связь называют *отрицательной*, если суммируется с ним, то обратную связь называют *положительной* $X_1 = X_{вх.}(p) + X_{o.c.}(p)$. В большинстве САР для обеспечения устойчивой работы применяют отрицательную обратную связь.

Передаточная функция системы со звеном обратной связи $W_{o.c.}(p)$

$$W_{c.o.c.}(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_{o.c.}(p)}. \quad (2.21)$$

Знак «+» в знаменателе формулы соответствует отрицательной обратной связи, а знак «-» — положительной обратной связи.

В результате введения обратной связи образуется *замкнутая система*. Если обратная связь в системе разомкнута, то систему называют *разомкнутой*. Можно считать, что передаточная функция прямой цепи $W_1(p)$ соответствует разомкнутой системе с передаточной функцией $W_{\text{раз}}(p)$. Тогда передаточная функция замкнутой системы

$$W_{\text{замкн}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 \pm W_{\text{раз}}(p)W_{o.c.}(p)}. \quad (2.22)$$

Если выходную величину подать по цепи обратной связи прямо на вход суммирующего элемента (см. рис. 2.13, г), что соответству-

ет $W_{o.c}(p) = 1$, то передаточная функция замкнутой системы упрощается

$$W_{\text{замкн}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 \pm W_{\text{раз}}(p)}. \quad (2.23)$$

Обратную связь при $W_{o.c}(p) = 1$ называют *единичной*.

Для улучшения качества процесса регулирования применяют жесткие и гибкие обратные связи. *Жесткая обратная связь* действует как в переходном, так и установившемся режимах регулирования. Средствами осуществления таких связей могут служить устройства измерения, передающие сигналы с ОУ на сравнивающее устройство. *Жесткие обратные связи* имеют место в статических системах. *Гибкие обратные связи* действуют только в период переходного процесса. В установившемся режиме их действие прекращается. Они передают на устройство сравнения воздействия, являющиеся производными или интегралами величин, изменяющихся во времени, в целях корректирования переходного процесса в нужном направлении. Если, например, сигнал обратной связи пропорционален интегралу от выходного сигнала элемента или системы, то такая гибкая обратная связь служит для устранения статической ошибки.

Рассмотренные преобразования структурных динамических схем проводят в целях их упрощения и приведения к виду, удобному для исследования. Основное условие преобразования структурных схем в эквивалентные — неизменность динамических характеристик системы.

Контрольные вопросы и задания

1. Какими параметрами и характеристиками описывают САР в статическом режиме? 2. Что такое типовые входные воздействия и в чем их преимущества при исследовании САР? 3. Опишите частотные характеристики САР. 4. Как строят логарифмические частотные характеристики? 5. В чем преимущества исследования САР с помощью логарифмических частотных характеристик? 6. Опишите свойства типовых динамических звеньев САР, их характеристики и передаточные функции. 7. Какие существуют виды соединений динамических звеньев САР? 8. Какие бывают обратные связи в САР и их свойства?

2.2.5. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Объект управления (ОУ) — основной элемент любой системы автоматического регулирования. При решении задач автоматизации ТП необходима информация о свойствах ОУ, поскольку они оказывают существенное влияние на процесс управления. Поэтому при создании САР аналитическими или эксперименталь-

ными методами находят статические и динамические характеристики ОУ.

К основным характеристикам ОУ относят аккумулирующую способность, самовыравнивание, запаздывание процесса регулирования, время разгона, статическую ошибку.

В процессе работы объект управления может накапливать вещество или энергию. Это свойство ОУ называют *аккумулирующей способностью*. Количество вещества или энергии, которое может накапливать ОУ, называют *емкостью С*. Коэффициент, показывающий количество вещества или энергии, которое необходимо подвести к объекту или отвести из него, чтобы изменить значение регулируемой величины u на единицу измерения Δu , называют *коэффициентом емкости $c = C/\Delta u$* . Так, при регулировании температуры коэффициент емкости будет иметь вид: $c = Q/\Delta t$, где Q — количество теплоты (Дж), которое необходимо подать к ОУ или отвести от него для изменения температуры Δt ($^{\circ}\text{C}$) на один градус. Чем больше данный коэффициент, тем медленнее изменяется управляемая величина под действием внешних воздействий, что облегчает процесс регулирования.

Различают безъемкостные, одноемкостные и многоемкостные ОУ. Если аккумулированное в объекте вещество или энергия легко (без препятствий) переходит из одного участка в другой, то такой объект называют *одноемкостным*. В нем входная величина непосредственно воздействует на выходную величину. В примере с емкостью, заполняемой водой, уровень жидкости (выходная величина) непосредственно зависит от расхода жидкости (входная величина), поэтому такой ОУ является одноемкостным. В *многоемкостных* ОУ входная величина воздействует на выходную через промежуточные емкости, как, например, в сообщающихся сосудах. К *безъемкостным* ОУ можно отнести трубопроводы, имеющие длину, намного превышающую их диаметр.

Свойство ОУ, выведенного из положения равновесия, возвращаться к прежнему или переходить к новому устойчивому состоянию без воздействия регулятора называют *самовыравниванием*. Чем больше у объекта способность самовыравнивания, тем легче им управлять. При значительном самовыравнивании можно вообще обойтись без автоматического регулятора. Рассмотрим это свойство на примере резервуара с водой.

На расходной магистрали объекта (рис. 2.14, а) отсутствует насос, и жидкость вытекает через ventиль B_2 самопроизвольно. В установившемся режиме уровень жидкости H_1 в баке постоянный, а приток жидкости $Q_{\text{пр}}$ через ventиль B_1 равен расходу Q_p . При увеличении в момент t_1 притока на величину $\Delta Q_{\text{пр}}$ равенство между величинами $Q_{\text{пр}}$ и Q_p нарушается, и уровень жидкости в баке, а соответственно и гидростатическое давление, определяющее расход Q_p , будут расти. Равенство притока и стока $Q_{\text{пр}} = Q_p$ может быть достигнуто (если позволит высота бака) при уровне H_2 .

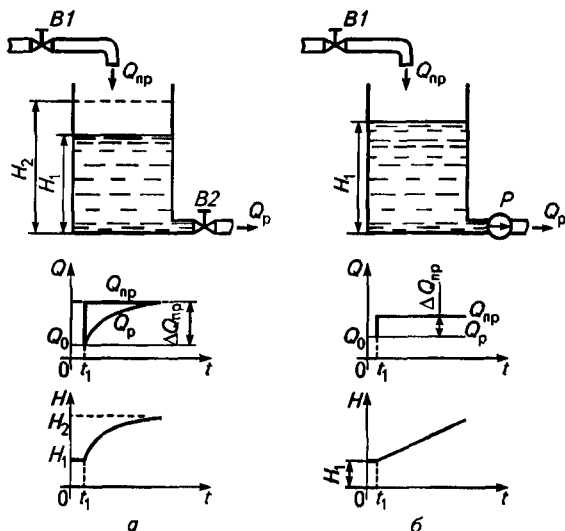


Рис. 2.14. Объект управления и его характеристики:

а — ОУ с самовыравниванием; б — ОУ без самовыравнивания; $Q(t)$ — изменение притока Q_{np} и расхода Q_p воды; $H(t)$ — изменение уровня воды в баке

Если жидкость из бака откачивают с помощью насоса P постоянного расхода (рис. 2.14, б), то увеличение притока от начального значения Q_0 приводит к постепенному росту уровня воды в баке вплоть до его переполнения. Начав изменяться, выходная величина H не возвращается к новому установившемуся значению. Такие объекты не обладают свойством самовыравнивания. Механизм самовыравнивания аналогичен механизму отрицательной обратной связи. Чем большее возмущающее воздействие испытывает объект, тем большее сопротивление этому возмущению он оказывает.

ОУ с самовыравниванием называют *статическими* или *устойчивыми*, а объекты, в которых при возмущении происходит неограниченное непрерывное изменение выходной величины с постоянной скоростью, пропорциональной величине возмущения, называют *астатическими* или *нейтральными*. Такие объекты не могут работать без автоматических регуляторов.

К сельскохозяйственным объектам с самовыравниванием относят сушильные и охладительные установки, водонагревательные устройства, животноводческие и другие помещения, выходной параметр которых — температура, а входной — количество теплоты, подаваемое в ОУ. Объекты без самовыравнивания — это водонапорные и сенажные башни, емкости и бункеры. Их выходной па-

раметр — уровень материала в емкости, входной — количество материала, подаваемого в емкость сверху.

Реакция ОУ на возмущающее или регулирующее воздействие не может быть мгновенной. Отставание начала изменения регулируемой величины от момента приложения воздействия называют *запаздыванием процесса регулирования*. В зависимости от причин, вызывающих запаздывание, оно может быть *переходным (инерционным)* и *чистым (транспортным)*.

Переходное запаздывание $t_{\text{зап.п}}$ появляется из-за сопротивления переходу вещества из одной емкости в другую или энергии из одного состояния в другое. Этот вид запаздывания характерен для объектов с аккумулирующей способностью (ОУ с емкостями, индуктивностями, вращающимися массами и др.). Чем больше коэффициент емкости, тем больше будет переходное запаздывание. Переходное запаздывание — следствие проявления инерционности объектов и отрицательно влияет на процесс управления.

Инерционные свойства ОУ удобно определять по *переходной характеристике*, представляющей собой реакцию ОУ на скачок входного воздействия Δz . Переходную характеристику, полученную экспериментально, как указывалось выше, называют *кривой разгона*.

На рисунке 2.15, а приведена переходная характеристика ОУ, описываемого аperiodическим звеном первого порядка [формула (2.12)].

Математическое выражение для этой кривой имеет следующий вид:

$$y(t) = y_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_{0,y}}), \quad (2.24)$$

где $y_{\text{уст}}$ — установившееся значение регулируемой величины; $T_{0,y}$ — постоянная времени объекта управления.

Значение $T_{0,y}$ можно определить по графику *методом касательной*. Для этого проводят касательную к любой точке (точка *a*) кривой (экспоненты) и ведут ее до пересечения с прямой, проведен-

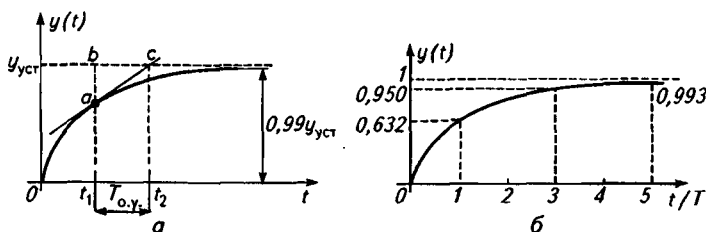


Рис. 2.15. Переходная характеристика (а) и кривая разгона (б) аperiodического звена первого порядка

ной на уровне $0,99y_{уст}$. Отрезок $bc = t_2 - t_1$ и будет постоянной времени $T_{0,y}$. Под *постоянной времени* понимают время, за которое закончился бы переходной процесс, если бы он начался в данный момент времени (t_1) и продолжался с постоянной скоростью, т. е. по прямой.

Для оценки длительности переходного процесса построим кривую разгона (рис. 2.15, б). По оси абсцисс отложим время в относительных единицах t/T , а значение $y_{уст} = y(\infty)$ по оси ординат примем равным единице. Подставляя в уравнение $y(t)$ вместо текущего времени значения постоянной времени от 1 до 5 ($T = 1...5$), получим ряд важных значений y на кривой разгона. Так, например, при $t = T$ получим значение $y_1 = 1 - \exp(-T/T) = 1 - 1/e = 0,632$, при $t = 3T$ — значение $y_3 = 0,950$, а при $t = 5T$ — значение $0,993$. Поскольку через интервал времени, равный $5T$, значение y достигает практически установившегося значения $y_5 \approx y(\infty)$, можно считать, что переходной процесс закончится в течение этого же промежутка времени $5T$.

Кроме метода касательной для определения постоянной времени существует еще ряд методов, основанных на результатах, полученных из графика кривой разгона (см. рис. 2.15, б). Рассмотрим два из них. Согласно первому, называемому «методом 0,632», на оси ординат откладывают значение, равное $0,632y_{уст}$, и проводят линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с кривой разгона, а затем из точки пересечения a опускают перпендикуляр на ось абсцисс (рис. 2.16). Отрезок Ob будет равен постоянной времени $T_{0,y}$. Согласно второму «экспресс-методу» на оси абсцисс откладывают отрезок, соответствующий времени переходного процесса $t_{п.пр}$ от его начала до момента времени, при котором регулируемая величина $y(t)$ будет отличаться от установившегося значения не более чем на 1 %, т. е. составлять $0,99y_{уст}$. Затем этот отрезок времени делят на коэффициент 4 или 5, а лучше на коэффициент 4,6. В результате постоянная времени будет равна $T_{0,y} = t_{п.пр}/4,6$.

Постоянная времени характеризует инерционность ОУ, т. е. его способность замедленно накапливать и расходовать вещество или энергию. Следует сказать, что чем больше постоянная времени, тем хуже объект поддается регулированию, но при этом и внешние возмущающие воздействия в меньшей степени оказывают влияние на изменения выходной величины y .

Для ОУ без самовыравнивания постоянную времени

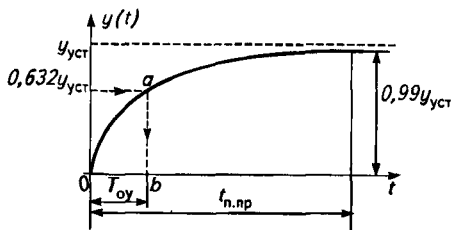


Рис. 2.16. Определение постоянной времени «методом 0,632» и экспресс-методом

T_A (ее также называют временем разгона) определяют следующим образом (рис. 2.17). В точке a , соответствующей номинальному значению регулируемой величины $y_{ном}$, проводят касательную к кривой разгона. Отрезок bc будет постоянной времени T_A .

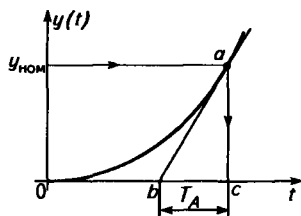


Рис. 2.17. Определение постоянной времени T_A (времени разгона) объекта управления без самовыравнивания

Время переходного процесса $t_{п.пр}$ и время разгона T_A служат, как и постоянная времени, для сравнения объектов управления по динамическим свойствам. Для резервуара с водой — это время, в течение которого емкость резервуара полностью заполнится или опорожнится при максимальной разности между притоком (регулирующим воздействием) и расходом. Используя такое свойство ОУ, как самовыравнивание, можно сказать, что постоянная времени ОУ — это время его разгона при отсутствии самовыравнивания, когда выходная величина растет с постоянной скоростью.

Чистое, или транспортное, запаздывание присуще тем объектам, у которых между регулирующим органом и объектом управления (точнее местом установки датчика устройства измерения) имеются передаточные каналы (транспортеры, трубопроводы и др.). Для прохождения такого канала веществу требуется время $t = l/v$, где l — длина передаточного канала, v — скорость перемещения вещества. *Транспортным запаздыванием* $t_{зап.т}$ называют отрезок времени между началом перемещения регулирующего органа и тем моментом времени, когда его действие начнет сказываться на объекте управления.

На рисунке 2.18 приведены переходные характеристики ОУ только с переходным запаздыванием (кривая 1) и с переходным и транспортным запаздыванием (кривые 2, 3). Полное запаздывание состоит из переходного и транспортного: $t_{зап} = t_{зап.п} + t_{зап.т}$.

Многие реальные ОУ (нагревательные установки, теплицы, животноводческие помещения и др.) имеют переходную характеристику, показанную на рисунке 2.19 (кривая 1).

На начальном отрезке $0a$ этой кривой можно выделить участок транспортного запаздывания $t_{зап.т}$. В дальнейшем регулируемая величина $y(t)$ изменяется в соответствии с кривой, которая описывается аperiодическим звеном второго порядка [формула (2.4)]. Определить коэф-

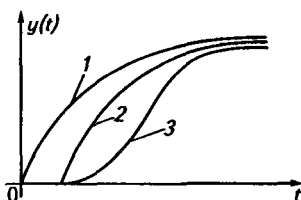


Рис. 2.18. Переходные характеристики ОУ, описываемого:

1 — аperiодическим звеном первого порядка без запаздывания; 2 — то же, но с запаздыванием; 3 — аperiодическим звеном второго порядка с запаздыванием

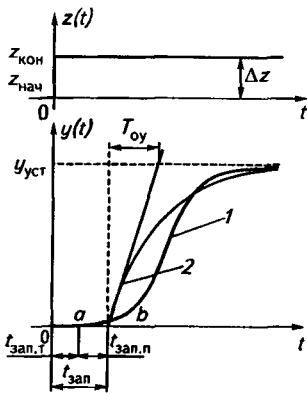


Рис. 2.19. Аппроксимация переходной характеристики аperiodического звена второго порядка (1) аperiodическим звеном первого порядка (2)

фициенты передаточной функции такого звена достаточно сложно. Поэтому для упрощения анализа объект управления, имеющий кривую разгона I , приведенную на рисунке 2.19, аппроксимируют цепью из двух последовательно соединенных звеньев: аperiodического звена первого порядка и звена запаздывания с общим запаздыванием $t_{\text{зап}} = t_{\text{зап.п}} + t_{\text{зап.т}}$. Передаточная функция такого ОУ имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_{o,y}}{T_{o,y} p + 1} e^{-pt_{\text{зап}}}, \quad (2.25)$$

где $k_{o,y}$ и $T_{o,y}$ — соответственно коэффициент передачи и постоянная времени ОУ; $t_{\text{зап}}$ — общее время запаздывания, определяемое по кривой разгона.

Чтобы найти значения $k_{o,y}$, $T_{o,y}$ и $t_{\text{зап}}$, аппроксимируем кривую разгона I экспонентой Z [формула (2.24) и рис. 2.15, a], являющейся переходной характеристикой аperiodического звена первого порядка. Коэффициент передачи будет равен $k_{o,y} = (y_{\text{уст}} - y_{\text{нач}}) / (z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}})$, где в нашем случае $y_{\text{нач}} = 0$ — начальное значение регулируемой величины в момент начала внешнего ступенчатого воздействия $z_{\text{нач}}$; $z_{\text{кон}}$ — конечное значение внешнего воздействия на ОУ. В общем случае $z_{\text{нач}}$ может быть и неравным нулю. Так, например, для трубчатого электронагревателя (ТЭН), работающего от промышленной сети напряжением 220 В, входное ступенчатое воздействие (включение ТЭН в сеть) будет равно $\Delta z = z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}} = 220 - 0 = 220$ В. При использовании в САР исполнительного механизма с регулирующим органом коэффициент $k_{o,y}$ вычисляют как отношение приращения регулируемой величины к значению хода регулирующего органа, выраженному в процентах. На рисунке 2.19 постоянная времени $T_{o,y}$ определена путем проведения касательной к аппроксимирующей кривой в начальной точке b , хотя можно было выбрать и другую точку на экспоненте. Общее время запаздывания $t_{\text{зап}}$ складывается из транспортного запаздывания $t_{\text{зап.т}}$ (отрезок $0a$) и переходного запаздывания $t_{\text{зап.п}}$ (отрезок ab).

Для астатических объектов с запаздыванием кривая разгона приведена на рисунке 2.20.

Из рисунка 2.20 видно, что сначала имеет место транспортное запаздывание $t_{\text{зап.т}}$, а затем кривая разгона становится прямой линией с углом наклона α к оси абсцисс. Проведя из точки d , соответствующей номинальному (конечному) значению регулируемой

величины $y_{\text{НОМ}}$, касательную и перпендикуляр к оси абсцисс, найдем значения переходного запаздывания $t_{\text{зап.п}}$ (отрезок ab) и время разгона T_A выходной величины y до ее номинального значения (отрезок bc), которое может быть найдено по формуле $T_A = y_{\text{НОМ}}/\text{tg}\alpha$. Замена криволинейного участка экспериментальной кривой на две прямых линии не приводит к большим погрешностям при аппроксимации и в то же время значительно упрощает исследование САР.

Передаточная функция объектов управления, описываемых кривой, приведенной на рисунке 2.20, имеет вид:

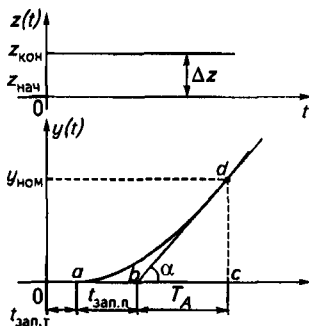


Рис. 2.20. Кривая разгона для астатического объекта управления с запаздыванием

$$W(p) = \frac{k'_{o.y}}{p} e^{-p t_{\text{зап}}}, \quad (2.26)$$

где $t_{\text{зап}} = t_{\text{зап.п}} + t_{\text{зап.т}}$, а $k'_{o.y}$ – коэффициент передачи ОУ:

$$k'_{o.y} = \frac{y_{\text{НОМ}} - y_{\text{нач}}}{(z_{\text{НОМ}} - z_{\text{нач}}) T_A}. \quad (2.27)$$

2.2.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Как было указано выше, рассмотренные статические и динамические характеристики элементов и систем автоматики, необходимые для синтеза САР ТП сельскохозяйственного производства, могут быть получены аналитически и экспериментально. Экспериментальное определение этих характеристик может быть проведено в ходе активного и пассивного эксперимента.

В первом случае задают типовое входное воздействие, во втором случае объект исследуют путем сопоставления выходных и входных величин в условиях нормальной эксплуатации объекта.

При определении статических характеристик с помощью активного эксперимента каждая входная величина x_i ступенчато изменяется на Δx_i в пределах рабочего диапазона $x_{i \text{ max}} - x_{i \text{ min}}$, а выходная величина y измеряется после окончания переходного процесса, т. е. спустя $(2...3)t_{\text{п.пр}}$, где $t_{\text{п.пр}}$ – время переходного процесса. Общее число проводимых опытов β_i , которое находят из выражения $\beta_i = (x_{i \text{ max}} - x_{i \text{ min}})/\Delta x_i$, выбирают ориентировочно в пределах 6...10. Если полученная статическая характеристика

$y = f(x_1, \dots, x_n)$ нелинейная, ее линеаризуют одним из рассмотренных выше методов.

Определение статических характеристик объекта без использования входных воздействий проводят с привлечением математического аппарата теории случайных процессов. При этом изменение регистрируемой выходной величины y обусловлено случайными изменениями как входных величин, так и процессами, происходящими в самом объекте. Полученные в результате эксперимента статистические характеристики позволяют найти связь между входными и выходными параметрами объекта в статическом режиме.

Экспериментальное определение динамических характеристик проводят, как указывалось ранее, с помощью подачи на вход объекта ступенчатого или гармонического воздействия. В результате получают временные или частотные характеристики. Входное воздействие в виде скачка или прямоугольного импульса реализуется установкой регулирующего органа в положение, соответствующее 5...15 % значения его полного хода. При этом объект должен находиться под нагрузкой, соответствующей середине рабочего диапазона x_c : $x_c \approx (x_{\max} - x_{\min})/2$.

Далее снимают переходные характеристики в течение всего переходного процесса (около $3T_{об}$), где $T_{об}$ — постоянная времени объекта. По полученным в эксперименте временным характеристикам находят соответствующие им передаточные функции. Для практических целей чаще всего используют передаточные функции апериодического звена первого порядка с запаздыванием (в случае статических объектов) [формула (2.25)] и интегрирующего звена с запаздыванием (в случае астатических объектов) [формула (2.26)].

Параметры аппроксимирующих передаточных функций — постоянную времени, время запаздывания и коэффициент передачи — находят по полученным кривым разгона.

Входное воздействие в виде прямоугольного импульса используют в том случае, если по условиям протекания технологического процесса не допускается длительное входное воздействие в виде скачка. Полученная в результате импульсная переходная характеристика преобразуется в переходную характеристику, однозначно связанную с ней.

Если требуется исследовать динамические свойства объекта автоматизации с помощью частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, АФЧХ), то в качестве входного воздействия используют синусоидальный сигнал. Для этого на вход объекта подается гармонический сигнал $x(t)$ заданной амплитуды $A_{вх}$ и частоты $\omega = 2\pi/T$, где T — период входного воздействия, и регистрируются колебания выходной величины $y(t)$ (рис. 2.21). В результате определяют зависимость амплитуды выходных колебаний $A_{вых}(\omega)$ и сдвига фаз $\varphi(\omega)$ между входными и выходными колебаниями от частоты ω .

Рис. 2.21. Экспериментальное определение частотных характеристик объекта управления:

$x(t)$ — входное воздействие; $y(t)$ — колебания выходной величины

Параметры проведения опытов определяют из следующих соотношений. Амплитуду входных колебаний $A_{вх}$ выбирают из условия $A_{вх} \leq \Delta x_{лин}/2$, где $\Delta x_{лин}$ — величина линейной части статической характеристики объекта. Нижняя частота диапазона входных колебаний $\omega_n \approx 1/T_{об}$, а верхняя частота ω_b равна частоте, на которой отношение амплитуд $A_{вых}(\omega_b)/A_{вх}(\omega_n)$ становится меньше 0,1. Продолжительность опыта для каждой частоты ω_i составляет $(5...15)T$ и определяется необходимостью стабилизации выходных колебаний в системе после подачи входного синусоидального воздействия.

После снятия экспериментальных данных АФЧХ объекта строят по точкам, для каждой частоты входных колебаний ω_i . Координаты точек определяют из следующих выражений:

$$W(\omega_i) = A_{вых}(\omega_i)/A_{вх}(\omega_i) \quad \text{и} \quad \varphi(\omega_i) = (-2\pi/T)\Delta t_i,$$

где Δt — сдвиг по времени между выходным и входным синусоидальными колебаниями (см. рис. 2.21).

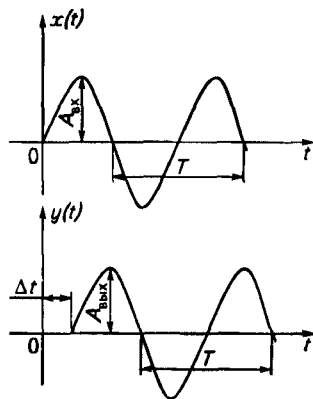
Выражение для АФЧХ будет иметь вид формулы (2.5):

$$W_{об}(j\omega) = W(\omega)e^{-j\varphi(\omega)}.$$

Полученная в результате эксперимента АФЧХ может быть использована для определения параметров объекта $k_{о.у}$, $T_{об}$ и $t_{зап}$. В качестве аппроксимирующей передаточной функции выбирают обычно выражение апериодического звена первого порядка с запаздыванием (2.25).

Контрольные вопросы и задания

1. Что называют объектом управления? 2. Охарактеризуйте основные свойства объектов управления. 3. Как влияют свойства объекта управления на процесс регулирования? 4. Как экспериментально определить статические и динамические характеристики САУ?



2.3. АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.3.1. УСТОЙЧИВОСТЬ САР

В процессе работы автоматическая система должна поддерживать заданное значение регулируемой величины или изменять его по определенному закону с требуемой точностью. В установившемся режиме вследствие неизменности во времени внешних воздействий значение регулируемой величины также не изменяется. При возникновении возмущающих воздействий состояние равновесия в САР нарушается. В ней возникает переходный процесс.

Для линейной системы связь между выходной величиной $y(t)$ и входным воздействием $x(t)$ выражается линейным дифференциальным уравнением n -го порядка

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = \\ = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx(t)}{dt} + b_m x(t), \end{aligned} \quad (2.28)$$

где a_0, \dots, a_n — постоянные коэффициенты, характеризующие параметры системы управления, b_0, \dots, b_m — постоянные коэффициенты, определяющие параметры входного воздействия, причем $m \leq n$.

Поведение системы в переходном процессе можно представить суммой двух составляющих

$$y(t) = y_c(t) + y_b(t),$$

где $y_c(t)$ — характеризует свободное движение системы, определяемое свойствами самой системы и начальными условиями; $y_b(t)$ — характеризует вынужденное движение системы, определяемое внешними воздействиями и свойствами системы.

Введем понятие устойчивости системы — одной из главных характеристик функционирования САР. *Устойчивость* — это способность системы восстанавливать состояние равновесия, из которого она была выведена в результате внешнего воздействия. Исследование САР на устойчивость имеет большое значение, так как замкнутые САР, охваченные обратными связями, обычно склонны к неустойчивой работе.

Устойчивость системы определяется характером ее движения после прекращения входного воздействия $x(t)$, т. е. при $t > \tau_b$ (рис. 2.22).

На рисунке 2.22 приведены графики, иллюстрирующие движе-

Рис. 2.22. Графики, поясняющие поведение САР в результате входного воздействия $x(t)$:

$y_1(t)$ — устойчивая система; $y_2(t)$ — неустойчивая система;
 $y_3(t)$ — нейтральная система

ние соответственно устойчивой $y_1(t)$, неустойчивой $y_2(t)$ и нейтральной $y_3(t)$ системы (системы, находящейся на границе устойчивости).

В устойчивых системах в переходном режиме свободная составляющая движения $y_c(t)$ с течением времени должна стремиться к нулю, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} y_c(t) \rightarrow 0$. На основании

уравнения (2.28) после снятия внешнего воздействия [$x(t) = 0$] движение замкнутой системы при $t > \tau_B$ (см. рис. 2.22) описывают однородным дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \\ + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Решение этого уравнения

$$y_c(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{p_i t}, \quad (2.30)$$

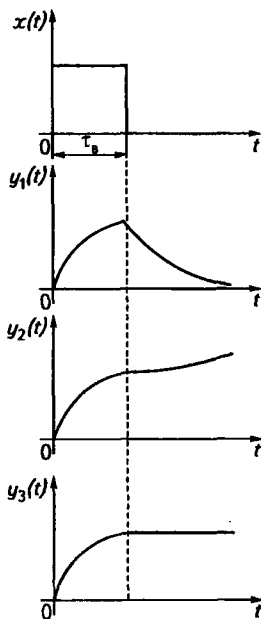
где C_i — постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями системы; p_i — корни алгебраического (характеристического) уравнения, полученного из (2.29) путем замены операции дифференцирования оператором p

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (2.31)$$

Из формулы (2.30) видно, что характер свободного движения системы зависит от корней p_i характеристического уравнения, которые в общем случае можно считать комплексно-сопряженными

$$p_i = \pm \alpha_i \pm j\beta_i,$$

где α_i — действительная часть комплексного корня; β_i — мнимая часть комплексного корня.



Если корни характеристического уравнения (2.31) действительные, т. е. $p_i = \pm \alpha_i$, то слагаемые в формуле (2.30) представляют собой экспоненту $y_c(t) = C_i e^{\alpha_i t}$. При этом если $p_i = -\alpha_i$, процесс будет затухать (рис. 2.23, а, кривая 1), при $p_i = \alpha_i$ процесс будет расходиться (см. рис. 2.23, а, кривая 2), а при $p_i = 0$ процесс не будет изменять своего состояния (см. рис. 2.23, а, кривая 3). В первом случае система будет устойчивой, во втором — неустойчивой, в третьем случае система будет находиться на границе устойчивости.

Если корни характеристического уравнения комплексные, то слагаемые в формуле (2.30) будут иметь вид

$$y_c(t) = C_i e^{\alpha_i t} \sin(\beta_i t + \varphi_i),$$

где φ_i — начальная фаза колебания.

При $p_i = -\alpha_i \pm j\beta_i$ процесс будет представлять затухающие колебания (рис. 2.23, б), при $p_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ — колебания будут расходящимися (рис. 2.23, в), при $p_i = \pm j\beta_i$ — колебания будут незатухающими с постоянной амплитудой (рис. 2.23, г). В первом случае система будет устойчивая, во втором — неустойчивая, в третьем случае, когда имеется пара чисто мнимых корней, система находится на границе устойчивости.

Если в характеристическом уравнении все действительные части α_i комплексных корней и все действительные корни p_i отрицательны, то с течением времени все слагаемые в уравнении (2.30) будут стремиться к нулю и система будет устойчивой. Если хотя бы один из действительных корней или действительная часть пары комплексных корней окажется положительной, то соответствующие им слагаемые в формуле (2.30) с течением времени будут неограниченно возрастать и система будет неустойчивой.

Таким образом, линейная САР будет устойчивой, если действительные части всех корней ее характеристического уравнения отрицательны. Следовательно, чтобы установить устойчивость системы, необходимо решить характеристическое уравнение, т. е.

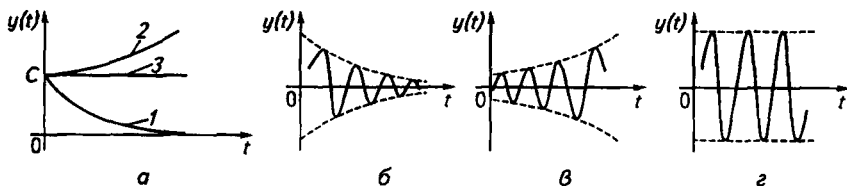


Рис. 2.23. Графики свободного движения системы:

а — при $p_i = -\alpha$ (кривая 1); при $p_i = \alpha$ (кривая 2); при $p_i = 0$ (кривая 3); б — при $p_i = -\alpha \pm j\beta$; в — при $p_i = \alpha + j\beta$; г — при $p_i = \pm j\beta$

найти его корни, и по их знакам сделать вывод об устойчивости. Однако нахождение корней характеристического уравнения выше третьего порядка представляет значительные трудности. Поэтому для оценки устойчивости САР найдены специальные признаки, позволяющие без решения характеристического уравнения судить об устойчивости САР. Эти признаки носят название *критериев устойчивости*.

Для определения устойчивости системы применяются алгебраические критерии Гурвица, Рауса и частотные критерии Михайлова и Найквиста.

Алгебраические критерии. Они основаны на анализе коэффициентов характеристического уравнения САР. *Характеристическое уравнение* получают из выражения передаточной функции исследуемой замкнутой САР, приравнивая нулю знаменатель передаточной функции.

Согласно *критерию Гурвица* САР будет устойчива, если все коэффициенты характеристического уравнения n -го порядка положительны и все определители Гурвица до $n-1$ -го порядка больше нуля. Определители Гурвица составляют следующим образом. По главной диагонали определителя в порядке возрастания индексов выписывают коэффициенты характеристического уравнения, начиная с a_1 , до a_n . От каждого коэффициента главной диагонали по вертикали вверх выписывают коэффициенты с возрастающими и вниз — с убывающими индексами. На месте коэффициентов с индексами больше n и меньше 0 проставляют нули.

Рассмотрим для примера систему четвертого порядка, для которой характеристическое уравнение имеет вид $a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4 = 0$. САР будет устойчива, если коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 больше нуля и определители третьего и второго порядков также больше нуля:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3(a_1a_2 - a_0a_3) - a_1^2a_4 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1a_2 - a_0a_3 > 0.$$

Важно отметить, что если приравнять нулю конечный определитель ($\Delta_{n-1} = 0$) при условии, что все остальные определители больше нуля, то получим уравнение, соответствующее нахождению системы на границе устойчивости. Так, для нашего примера это условие запишется в виде: $\Delta_3 = a_3(a_1a_2 - a_0a_3) - a_1^2a_4 = 0$. Из полученного выражения можно определить допустимые пределы изменения коэффициентов $a_0 \dots a_4$, для которых обеспечивается устойчивость системы.

Частотные критерии. Они основаны на анализе частотных характеристик САР.

Для исследования системы на устойчивость по критерию Михайлова в характеристическом уравнении (2.31) замкнутой САР оператор p заменяют на выражение $j\omega$ и получают аналитическое выражение вектора Михайлова, которое можно разделить на действительную и мнимую части:

$$M(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega).$$

Далее строят *годограф* вектора Михайлова — кривую, которую описывает конец вектора Михайлова на комплексной плоскости при изменении частоты ω от 0 до ∞ .

Критерий Михайлова формулируют следующим образом: замкнутая система будет устойчивая, если годограф вектора Михайлова при $\omega = 0$ начинает свое движение с положительной действительной полуоси комплексной плоскости, движется против часовой стрелки, нигде не петляет и не обращается в нуль, последовательно обходит столько квадрантов комплексной плоскости, каков порядок исходного характеристического уравнения замкнутой системы и уходит в последнем квадранте в бесконечность.

На рисунке 2.24 приведены примеры годографов Михайлова устойчивых систем с первого ($n = 1$) до четвертого ($n = 4$) порядка. Если годограф Михайлова проходит через начало координат, то система находится на границе устойчивости.

Критерий Найквиста позволяет определить устойчивость замкнутой САР, используя амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) разомкнутой САР. Для этого, заменив оператор p в передаточной функции разомкнутой САР на выражение $j\omega$, строят АФЧХ системы при изменении частоты ω от 0 до ∞ . По критерию

Найквиста замкнутая САР будет устойчивая, если АФЧХ разомкнутой системы на комплексной плоскости не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$. На рисунке 2.25 приведены АФЧХ, соответствующие устойчивой 1 и неустойчивой 2 замкнутым САР.

Запас устойчивости САР. Параметры реальной САР при эксплуатации могут отличаться от рассчитанных значений. Поэтому для обеспечения надежной работы САР ей необходимо обеспечить запас устойчивости. Тогда в процессе работы изменение параметров системы не выведет систему из устойчивого состояния.

Критерий Найквиста позволяет количественно оценить запас устойчивости САР

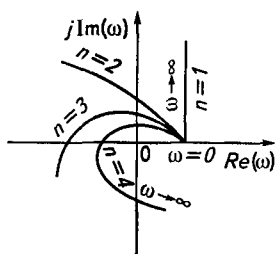
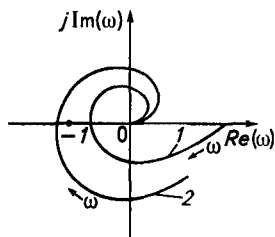


Рис. 2.24. Годографы Михайлова для устойчивых систем первого ($n = 1$), второго ($n = 2$), третьего ($n = 3$) и четвертого ($n = 4$) порядков

Рис. 2.25. Критерий Найквиста:

1 — АФЧХ устойчивой САР; 2 — АФЧХ неустойчивой САР



по удаленности АФЧХ от критической точки $(-1, j0)$. Запас устойчивости обычно оценивают по фазе и модулю.

Для определения *запаса устойчивости по фазе* необходимо из начала координат провести окружность радиусом, равным 1, проходящую через точку $(-1, j0)$ (рис. 2.26, а). Эта окружность пересечет АФЧХ в точке А. Угол $\Delta\varphi$ между лучом, проведенным из начала координат через точку А, и отрицательной полуосью абсцисс характеризует запас устойчивости САР по фазе.

Для определения *запаса устойчивости по модулю* необходимо найти расстояние Δl от точки $(-1, j0)$ до точки пересечения амплитудно-фазочастотной характеристикой отрицательной полуоси абсцисс на участке между точкой $(-1, j0)$ и началом координат. Фактор, снижающий устойчивость системы, — это запаздывание, свойственное большинству ОУ. Запаздывающее звено с передаточной функцией, описываемой формулой (2.18), смещает график АФЧХ влево, уменьшая тем самым значения $\Delta\varphi$ и Δl .

Запас устойчивости замкнутой САР можно определить и по взаимному расположению *логарифмических амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик* системы в разомкнутом состоянии. Согласно критерию Найквиста система находится на границе устойчивости, если модуль АФЧХ разомкнутой системы $|W(j\omega)| = 1$, а аргумент $\varphi(\omega) = -\pi$. При этом $L(\omega) = 20\lg|W(j\omega)| = 0$, т. е. ЛАЧХ пересекает ось абсцисс. Точка пересечения ЛАЧХ оси

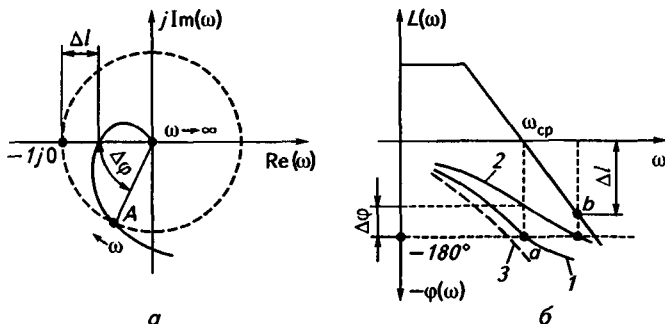


Рис. 2.26. Определение запаса устойчивости САР по фазе $\Delta\varphi$ и модулю Δl :

а — по АФЧХ, б — по логарифмическим частотным характеристикам; 1 — САР, находящаяся на границе устойчивости; 2 — устойчивая САР; 3 — неустойчивая САР

частот характеризуется *частотой среза* $\omega_{ср}$ (рис. 2.26, б). Для САР, находящейся на границе устойчивости, частота среза $\omega_{ср}$ на логарифмической амплитудно-частотной характеристике соответствует пересечению логарифмической фазочастотной характеристикой (кривая 1) асимптоты, имеющей значение -180° (точка *a* на рис. 2.26, б).

Тогда если САР устойчива (кривая ЛФЧХ 2), то при $\varphi = -\pi$ величина $|W(j\omega)| < 1$ и $L(\omega) = 20\lg|W(j\omega)| < 0$, т. е. ордината ЛАЧХ будет иметь отрицательный знак (точка *b*). На рисунке 2.26, б отрезок Δl характеризует запас устойчивости замкнутой САР по модулю, а отрезок $\Delta\varphi$ — запас устойчивости САР по фазе. График ЛФЧХ 3 соответствует неустойчивой САР. В реальных САР обеспечивают запас устойчивости по модулю 15...20 дБ, а по фазе 30...50°. САР с излишним запасом устойчивости характеризуется большим временем переходного процесса $t_{п.пр.}$, а значит, и меньшим быстродействием.

2.3.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ САР

Устойчивость работы САР — необходимое, но не достаточное условие правильной работы САР. Технология автоматизированного производства требует обеспечения определенных характеристик процесса регулирования, связанных с качеством регулирования.

Качество регулирования САР характеризуется двумя основными показателями — быстродействием и точностью. Оно определяется динамическими свойствами объекта управления, типом регулятора и его настройкой. Качество процесса регулирования оценивают в динамическом (переходном) и статическом (установившемся) режимах работы САР. Основные показатели, характеризующие качество процесса регулирования, можно определить из графика переходного процесса (переходной характеристики) (рис. 2.27), получаемого в результате ступенчатого возмущающего воздействия $f(t)$ на САР. При этом переходный процесс может быть аperiodическим (кривая 1) или колебательным (кривая 2). Рассмотрим эти показатели.

Динамическое отклонение y_1 характеризует максимальное отклонение регулируемой величины от ус-

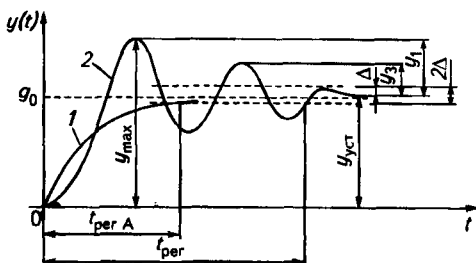


Рис. 2.27. Определение показателей качества регулирования по переходной характеристике:

1 — при аperiodическом переходном процессе; 2 — при колебательном переходном процессе

тановившегося значения $y_{уст}$. За $y_{уст}$ принимают такое значение регулируемой величины, которого она достигает по истечении достаточно большого промежутка времени $t > 5T_{0,y}$ с момента приложения к САР входного воздействия.

Перерегулирование σ — это динамическое отклонение, отнесенное к установившемуся значению регулируемой величины, выраженное в процентах, характеризует степень удаления САР от границы устойчивости

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\%, \quad (2.32)$$

где y_{\max} — максимальное значение регулируемой величины.

Время регулирования $t_{рег}$ характеризует быстроедействие САР. Это время от начала приложения внешнего воздействия к САР до вхождения регулируемой величины в заданную зону допустимых отклонений 2Δ . Значение Δ обычно принимают равным $\Delta = (0,03...0,05)y_{уст}$. Для апериодических переходных процессов на рисунке 2.27 время регулирования обозначено через $t_{рег,А}$. Время регулирования зависит от свойств ОУ, выбранного закона регулирования и параметров настройки регулятора.

Коэффициент затухания

$$\Psi = 1 - y_3/y_1.$$

Из выражения для Ψ следует, что чем меньше последующее отклонение y_3 выходной величины в положительную сторону по сравнению с предыдущим его отклонением y_1 в ту же сторону, тем больше затухание колебательного процесса. При незатухающем колебательном процессе $y_1 = y_3$ и коэффициент затухания $\Psi = 0$.

Колебательность системы характеризуется числом колебаний n графика переходного процесса относительно установившегося значения $y_{уст}$ за время регулирования $t_{рег}$. Каждый переход графика, кроме первого, через линию, проведенную на уровне значения $y_{уст}$, считают за половину периода колебаний. Так, для графика, приведенного на рисунке 2.27, колебательность составляет $n = 0,5 \cdot 3 = 1,5$ периода.

Косвенно колебательность процесса регулирования можно оценить и по экспериментально снятой амплитудно-частотной характеристике замкнутой САР (рис. 2.28).

Показатель колебательности M — это отношение максимального значения АЧХ (обычно на резонансной частоте $\omega_{рез}$) к

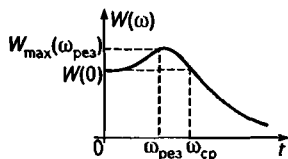


Рис. 2.28. Определение показателя колебательности M по АЧХ замкнутой САР

значению АЧХ на частоте $\omega = 0$: $M = W_{\max}(\omega_{\text{рез}})/W(0)$. Как правило, показатель колебательности принимают равным $M = 1,2 \dots 1,5$. При увеличении этого показателя колебательный процесс затухает медленно, а при значениях $M < 1,2$ переходный процесс из колебательного переходит в аperiodический и быстродействие САР снижается. Частоту, при которой $W(\omega) = A_{\text{вых}}(\omega)/A_{\text{вх}}(\omega) = 1$ [формула 2.5)], называют частотой среза $\omega_{\text{ср}}$. По ее значению можно косвенно судить о длительности переходного процесса, а значит, и о времени регулирования $t_{\text{рег}} = (1 \dots 2)2\pi/\omega_{\text{ср}}$.

Важный параметр, характеризующий качество работы САР, — *погрешность регулирования*, которая имеет две составляющие: динамическую и статическую. *Динамическая* погрешность — это динамическая ошибка регулирования, характеризующаяся, в частности, динамическим отклонением y_1 и перерегулированием σ . В переходном режиме она складывается на статическую погрешность. *Статическая* погрешность также складывается из двух составляющих. Первая составляющая зависит от метрологических характеристик элементов автоматической системы, а вторая — от типа САР и режимов ее работы.

Установившаяся статическая ошибка Δ_0 — разность между заданным g_0 и установившимся $y_{\text{уст}}$ значениями регулируемой величины, т. е. $\Delta_0 = g_0 - y_{\text{уст}}$ (см. рис. 2.27).

В *астатических* САР установившееся значение регулируемой величины равно ее заданному значению, поэтому $\Delta_0 = 0$, т. е. система после процесса регулирования возвращается в исходное состояние равновесия.

В *статических* САР при постоянной величине входного воздействия установившееся значение регулируемой величины отличается от ее заданного значения на величину установившейся статической ошибки. По каналу задающего воздействия, когда входная величина — g , а выходная — y , установившаяся статическая ошибка имеет следующий вид:

$$\Delta_0 = \frac{g_0}{1+k},$$

где g_0 — постоянное задающее воздействие; k — коэффициент передачи САР в разомкнутом состоянии.

По каналу возмущающего воздействия, когда входная величина — f , а выходная — y и отклонение задающего воздействия равно нулю, ошибка равна

$$\Delta f_0 = \frac{f_0 k_{o,y}}{1+k_{\text{рег}} k_{o,y}},$$

где f_0 — постоянное возмущающее воздействие; $k_{o,y}$ — коэффициент передачи объекта управления, $k_{\text{рег}}$ — коэффициент передачи регулятора.

Из последних выражений следует, что установившаяся ошибка в статической системе прямо пропорциональна входному возмущающему воздействию и зависит также от коэффициентов передачи объекта управления и регулятора. В частности, чем больше коэффициент передачи k разомкнутой системы, тем меньше установившаяся ошибка. Для примера с емкостью, которая наполняется водой (см. рис. 2.14, *a*), максимальная статическая ошибка $\Delta_0 \max$ регулирования уровня при наибольшем расходе воды ($Q_p = Q_p \max$) будет равна

$$\Delta_0 \max = H_0 - H_{\min},$$

где H_0 — заданный, H_{\min} — минимально допустимый уровни воды при регулировании (рис. 2.29).

На рисунке 2.29 прямая 1 соответствует статической САР, а прямая 2 — астатической системе. Примером астатической системы служит рассмотренная ранее САР уровня жидкости (см. рис. 2.4), для которой статическая ошибка равна нулю.

Относительная величина установившейся ошибки или *коэффициент статизма системы* по каналу задающего воздействия

$$s = 1/(1 + k),$$

а по каналу возмущающего воздействия

$$s = k_{o,y}/(1 + k_{\text{рег}} k_{o,y}).$$

На рисунке 2.30, *a* приведены графики переходных характеристик по каналу возмущающего воздействия в статической системе при колебательном и апериодическом переходных процессах, по которым можно определить установившуюся ошибку Δ_0 , а на рисунке 2.30, *б* для сравнения приведены аналогичные графики для астатической системы, при работе которой данной ошибки нет.

Из графиков на рисунке 2.30 можно определить общую статическую погрешность регулирования, характеризующую точность работы САР в установившемся режиме. Так, для статической системы общая погрешность будет включать статическую ошибку Δ_0 и зону допустимых отклонений Δ , а для астатических систем общая погрешность определяется только величиной $\pm \Delta$.

Для оценки качества регулирования САР наряду с отдельными показателями,

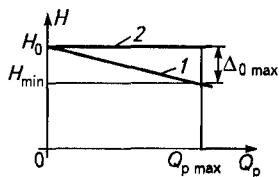


Рис. 2.29. Статические характеристики САР уровня воды:

1 — статическая САР; 2 — астатическая САР

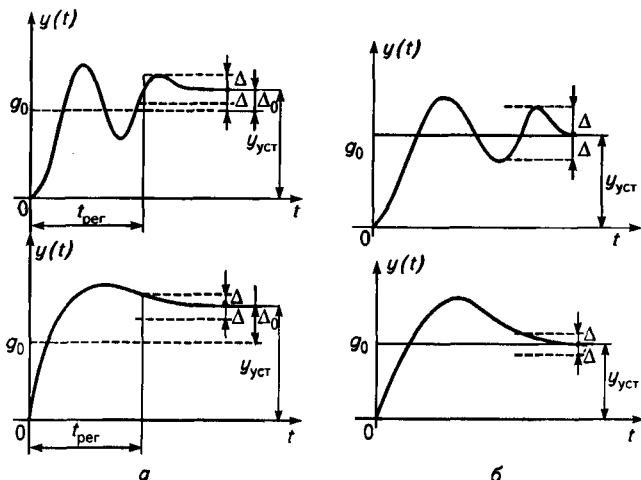


Рис. 2.30. Переходные характеристики САР при колебательном и аperiodическом процессах:

а — статическая САР; б — астатическая САР

рассмотренными выше, часто пользуются *интегральными оценками качества*, в основе определения которых лежит вычисление площади между кривой переходного процесса $y(t)$ и линией, проведенной на уровне установившегося значения $y_{уст}$ (рис. 2.31).

Чем меньше заштрихованная на графиках площадь, тем быстрее затухает переходный процесс и меньше значение отклонения, поэтому качество регулирования выше. Для того чтобы знак отклонения регулируемой величины от уровня $y_{уст}$ не сказывался на величине оценки, что имеет место в колебательном переходном процессе (рис. 2.31, б), используют *квадратичную интегральную оценку*

$$J_2 = \int_0^{\infty} (y(t) - y_{уст})^2 dt. \quad (2.33)$$

САР, имеющая минимальное значение интеграла J_2 , характеризуется высоким качеством регулирования.

При разработке САР в зависимости от наличия или отсутствия в них перерегулирования σ , а также от значения этого показателя, различают три типовых переходных процесса, используемых при выборе автоматических регуляторов: *aperиодический процесс, процесс с 20%-ным перерегуливанием и процесс с минимумом значения интеграла J_2 .*

При реализации в САР первого процесса регулируемый пара-

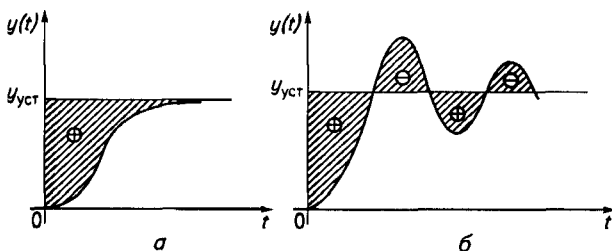


Рис. 2.31. Графическое представление интегральных критериев качества регулирования:

a — при аperiodическом переходном процессе; *б* — при колебательном переходном процессе

метр y после отклонения за счет внешнего воздействия плавно возвращается к заданной величине (см. рис. 2.30 — нижние кривые). Этот процесс обеспечивает минимальное время регулирования, но допускает максимальное динамическое отклонение. Показатель колебательности для данного переходного процесса $M = 1,3$. Во втором процессе по сравнению с аperiodическим меньше динамическое отклонение, но больше время регулирования. В третьем процессе регулирования минимизируется квадратичная интегральная оценка J_2 , что дает наименьшее динамическое отклонение, но время регулирования оказывается наибольшим (см. рис. 2.27), причем показатель колебательности возрастает до величины $M = 2,1$.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под устойчивостью систем управления? 2. Как определяют устойчивость САУ по критерию Гурвица? 3. Как определяют устойчивость САУ по критериям Михайлова и Найквиста? 4. В чем преимущества частотных критериев устойчивости САУ? 5. Что влияет на запас устойчивости САУ и как его определяют при использовании критерия Найквиста? 6. Охарактеризуйте основные показатели качества процесса регулирования САУ. 7. Как определяют показатели качества регулирования по кривой разгона? 8. Как по частотным характеристикам оценивают качество регулирования САУ? 9. Как определяют качество регулирования САУ с помощью интегральных оценок показателей качества?

2.4. СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В САУ

Выпуск качественной сельскохозяйственной продукции обусловлен получением объективной информации о состоянии и ходе технологических процессов. Технологии в сельском хозяйстве разнообразны, что вызывает необходимость получения информации о большом числе физических величин.

Нахождение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств называют измерени-

ем. Классификацию основных сведений по измерениям можно выполнить по признакам, определяющим вид, метод измерения и используемые технические средства.

Виды измерений. Их подразделяют на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

При *прямом* измерении численные значения физических величин находят непосредственно по показаниям измерительных приборов, градуированных в единицах измеряемой величины, например, измерение тока амперметром, длины предмета линейкой, массы тела на весах.

Прямые измерения не всегда возможны или достаточны. В таком случае используют косвенные измерения. При *косвенных* измерениях искомое значение физической величины находят на основании известной математической зависимости между искомой величиной и величинами-аргументами, получаемыми при прямых измерениях. Например, измерение влажности воздуха.

В некоторых случаях применяют совместные и совокупные измерения, являющиеся комбинацией прямых и косвенных измерений. При *совместных* и *совокупных* измерениях искомые значения физических величин находят решением системы уравнений, коэффициенты в которых получены при прямых измерениях. При совокупных измерениях одновременно измеряют несколько одноименных величин, а при совместных – разноименных.

Методы измерений. Они определяются совокупностью приемов использования средств измерений для нахождения значений измеряемой величины. Различают методы непосредственной оценки и сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки заключается в определении значения физической величины непосредственно по устройству отсчета прибора при прямом измерении.

Метод сравнения с мерой подразделяют на дифференциальный, нулевой, совпадений, замещений и противопоставлений.

При *дифференциальном* (разностном) методе на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и известной величин. Этот метод применяют при использовании устройства сравнения, служащего для создания разности между измеряемой и известной величинами, и устройства отсчета измерительного прибора.

В *нулевом* (компенсационном) методе результирующий эффект воздействия измеряемой и известной величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Метод совпадений заключается в том, что разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

В *методе замещения* измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Если при замерах измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, при помощи которого устанавливают соотношение между ними, то имеет место метод протитвопоставлений.

Средства измерений. Средства измерений — это технические устройства, используемые для измерений. К их числу относят: измерительные преобразователи, приборы, установки и системы, которые имеют нормированные, определяющие результат измерения свойства.

Измерительные преобразователи применяют в системах контроля и управления для получения информации о контролируемых и регулируемых параметрах объекта управления в форме, удобной для передачи, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя. Каждый измерительный преобразователь предназначен для преобразования входной величины X в выходной сигнал Y в соответствии с однозначной функциональной зависимостью между ними $Y = f(X)$.

Различают измерительные преобразователи неэлектрических и электрических величин. Для автоматизации технологических процессов применяют первичные измерительные преобразователи неэлектрических величин, которые преобразуют в электрический или пневматический сигнал неэлектрические величины, например давление, расход, температуру и т. п. Измерительные преобразователи электрических величин применяют для преобразования электрических величин. Они имеют на входе и выходе одинаковые физические величины. К ним относят: выпрямители, усилители, шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы и пр.

Измерительные приборы подразделяют на цифровые, в которых непрерывные показания преобразуются в дискретные и представляются в цифровой форме, и аналоговые, в которых показания — это непрерывная функция измерения измеряемой величины.

Измерительные установки и системы представляют собой совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств с общим алгоритмом функционирования для получения данных о величинах, характеризующих состояние объекта исследования. При этом в измерительных системах все составляющие их элементы могут быть территориально разобщены и соединены линиями связи, а в измерительных установках они конструктивно и территориально объединены.

2.4.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В механических преобразователях входные механические величины преобразуются в механические выходные сигналы. Такие преобразователи подразделяют на упругие, частотные, инерционные и датчики теплового расширения.

В *упругих преобразователях* выходная величина — это механическая деформация тела самого преобразователя, а входной могут быть сосредоточенная сила, крутящий момент, давление газа или жидкости.

Частотные преобразователи — это механические упругие преобразователи с инерционным элементом. Их используют для измерения перемещения, силы, давления и т. д. Они позволяют получить высокую точность преобразования.

Частота собственных колебаний системы с сосредоточенными параметрами

$$f = \frac{\sqrt{K/m}}{2\pi}, \quad (2.34)$$

где K — жесткость; m — масса, кг.

Изменяя жесткость или массу, воздействуют на частоту, являющуюся выходной величиной датчика.

Жесткость характеризуется силой, пропорциональной отклонению массы от нейтрального положения и направленной в сторону, противоположную отклонению. Указанная сила создается упругими элементами, на которых удерживается масса, или прикладывается к массе извне.

Датчики теплового расширения работают по принципу упругого измерения линейных размеров рабочего тела при изменении температуры. При этом перемещение свободного конца рабочего тела относительно закрепленного преобразуется в выходной сигнал.

Максимальная температура для данного типа датчиков 200...550 °С и определяется химической устойчивостью рабочего тела и стабильностью температурного коэффициента расширения.

К датчикам теплового расширения относят и датчики, имеющие биметаллическую пластинку, состоящую из двух слоев металлов с различными коэффициентами линейного расширения, сваренных между собой. При увеличении температуры биметаллическая пластинка изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

2.4.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

По принципу действия электромеханические преобразователи подразделяют на электромагнитные, резистивные, емкостные и пьезоэлектрические.

Электромагнитные преобразователи. В основном они бывают индуктивные, индукционные и магнитоупругие.

Индуктивные преобразователи используют для измерения усилий и линейных перемещений. Их действие основано на изменении индуктивности при линейных перемещениях подвижной час-

ти магнитной системы. Схемы простейших индуктивных преобразователей показаны на рисунке 2.32.

Преобразователи выполняют: с перемещающейся частью магнитопровода (рис. 2.32, *а*); с катушкой, имеющей стальной сердечник внутри (рис. 2.32, *б*); с подвижным немагнитным сердечником, изменяющим магнитное сопротивление воздушного зазора (рис. 2.32, *в*). Следует отметить, что указанные преобразователи характеризуются нелинейностью характеристики и влиянием температуры на их параметры.

На рисунке 2.32, *г, д, е* показаны дифференциальные преобразователи, которые имеют линейную характеристику в большом диапазоне изменения воздушного зазора. На их параметрах меньше сказывается изменение температуры.

Индукционные преобразователи представляют собой электрические машины переменного или постоянного тока, и чаще их называют тахогенераторами. Входная величина в таких преобразователях — угловая или линейная скорость, а выходная — пропорциональная ЭДС. В основе их действия лежит электромагнитная индукция.

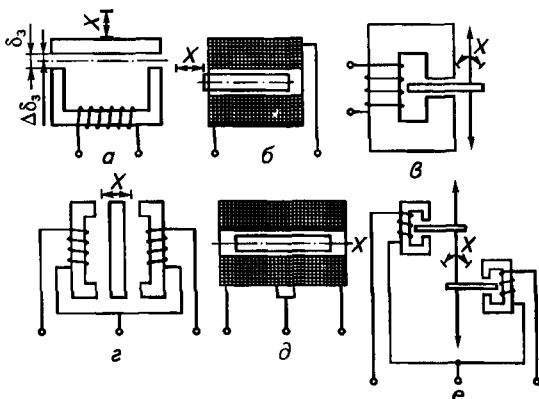
В сельскохозяйственном производстве индукционные преобразователи применяют для измерения угловых скоростей вращающихся валов машин.

Действие *магнитоупругих* преобразователей основано на изменении магнитной проницаемости ферромагнитных материалов при возникновении в них механических напряжений. В этих преобразователях входное механическое воздействие на магнитопровод приводит к изменению собственной индуктивности.

В магнитоупругом преобразователе (рис. 2.33) магнитопровод набран из листовой стали, что уменьшает потери на перемагничивание при питании преобразователя переменным током. Следует отметить, что максимальная чувствительность магнитоупругого преобразователя соответствует наибольшему току в его катушке.

Рис. 2.32. Основные разновидности индуктивных преобразователей:

а — с перемещающейся частью магнитопровода; *б* — с катушкой, имеющей стальной сердечник внутри; *в* — с подвижным немагнитным сердечником; *г, д, е* — дифференциальные; *X* — перемещение немагнитного сердечника; δ_1 — размер воздушного зазора; $\Delta\delta_1$ — изменение размера воздушного зазора



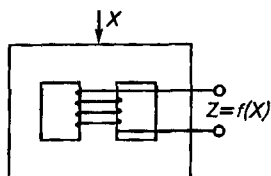


Рис. 2.33. Магнитоупругий преобразователь:

X — входная величина: механическое воздействие; $Z = f(X)$ — выходная величина

Резистивные преобразователи. По конструктивному исполнению их подразделяют на контактные, потенциметрические и тензометрические.

В *контактных* преобразователях используют зависимость переходного сопротивления контактов от усилия нажатия.

Потенциметрические преобразователи (рис. 2.34) выполнены в виде регулируемых проволочных резисторов, имеющих однозначную функциональную зависимость между сопротивлением и перемещением. Таким образом, входная величина потенциметрических преобразователей — это перемещение движка, которое может быть линейным или угловым, а выходная — активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

Провод преобразователя должен быть покрыт эмалью или слоем окислов, изолирующих соседние витки один от другого. Контактную поверхность намотанного провода полируют, ширина контактной поверхности движка должна быть равна 2...3 диаметра провода. Каркас преобразователя выполняют из текстолита или пластмассы.

Действие *тензометрических* преобразователей основано на тензоэффекте, заключающемся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации.

При измерениях тензометрические преобразователи применяют: 1) когда естественная входная величина — давление окружающей проводник жидкости или газа; 2) когда входная величина — сжатие или растяжение твердого тела (тензочувствительного материала).

Первое используют при создании манометров для измерения высоких и сверхвысоких давлений; второе — в устройстве наклеиваемого проволочного тензорезистора (рис. 2.35).

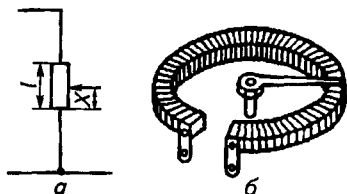


Рис. 2.34. Потенциметрические преобразователи:

a — линейного перемещения; b — углового перемещения; X — входная величина: перемещение движка; l — длина пути движка

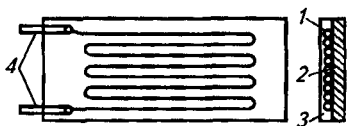


Рис. 2.35. Тензометрический преобразователь:

1 — тонкая проволока; 2 — полоска тонкой бумаги; 3 — слой лака; 4 — выводные проводники

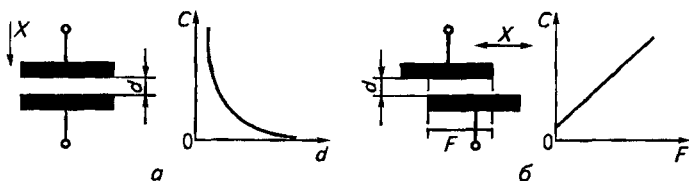


Рис. 2.36. Емкостные преобразователи:

a — с переменным зазором; *б* — с переменной площадью; *X* — перемещение

Конструктивно проволочный тензорезистор выполнен следующим образом. На полоску тонкой бумаги 2 наклеивают зигзагообразно уложенную тонкую проволоку 1 и покрывают ее сверху слоем лака 3. Концы проволоки присоединяют к выводным проводникам 4. Входная величина такого тензопреобразователя — деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен.

Емкостные преобразователи с плоскими электродами показаны на рисунке 2.36.

Емкость данного типа преобразователей изменяется за счет изменения расстояния между электродами, площади электродов или диэлектрической проницаемости диэлектрика, расположенного между электродами.

Емкость простейшего преобразователя плоского конденсатора

$$C = \epsilon F/d, \quad (2.35)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость; F — площадь электродов; d — расстояние между электродами.

Пьезоэлектрические преобразователи. Их действие основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в способности некоторых материалов, например кристаллов кварца, образовывать на своих гранях электрические заряды под действием механических напряжений.

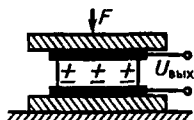
На рисунке 2.37 показан пьезоэлектрический преобразователь.

Выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала, поэтому на выход преобразователя подключают усилитель с возможно большим входным сопротивлением.

Преимущества пьезоэлектрических преобразователей — это простота конструкции, надежность в работе, возможность измерения быстропеременных величин, малые габариты.

Рис. 2.37. Пьезоэлектрический преобразователь:

F — усилие; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение



2.4.3. ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Преобразователь, действие которого основано на тепловых процессах, а естественная входная величина — температура, называют *тепловым*. К тепловым преобразователям относят жидкостные и манометрические термометры, термопреобразователи сопротивления, термопары.

Жидкостные термометры. Они представляют собой измерительные приборы неавтоматического действия для измерения температуры непосредственно в технологических объектах при лабораторных исследованиях и контрольных операциях. Их действие основано на использовании теплового расширения жидкости. Термометры состоят из стеклянной ампулы с капилляром, шкалы и корпуса.

Преимущества термометров — невысокая стоимость, удовлетворительная точность и простота эксплуатации. **Недостатки** — хрупкость, недостаточная видимость измерительной шкалы, значительная тепловая инерция.

Манометрические термометры. Они служат для регулирования, сигнализации и дистанционного измерения температуры в различных технологических установках. Их действие основано на измерении давления с последующим преобразованием его в механическое перемещение под действием изменения температуры.

Манометрическая термосистема содержит упругий элемент и термобаллон, герметично соединенные между собой капиллярной трубкой. Упругие элементы выполняют в виде сильфонов, трубчатых пружин, мембран.

Манометрические термометры применяют в диапазоне температур от -100 до 600 °С без дополнительного источника энергии и в пожаро- и взрывобезопасных помещениях.

Термопреобразователи сопротивления. Их изготавливают из полупроводниковых материалов, таких как кобальт, германий, оксиды марганца, а также из металлов — меди, платины и никеля.

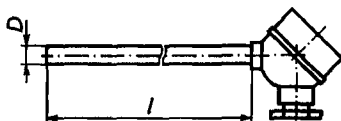
Полупроводниковые преобразователи сопротивления представляют собой непроволочные объемные резисторы. Они имеют малые размеры, значительное начальное электрическое сопротивление ($1 \dots 1000$ кОм), но требуют индивидуальной градуировки из-за разброса номинальных характеристик. Полупроводниковые терморезисторы применяют для измерения температур от -60 до 180 °С. В системах сигнализации используют свойство полупроводников скачкообразно изменять свое сопротивление при достижении определенной температуры.

Термопреобразователи сопротивления из медной проволоки применяют для измерения температур в технологических установках от -200 до 200 °С, а из платиновой — от -260 до 1100 °С.

Общий вид термопреобразователя сопротивления представлен на рисунке 2.38.

Рис. 2.38. Общий вид термопреобразователя сопротивления:

D — диаметр; l — длина стержня



В термопреобразователе сопротивления платиновую или медную проволоку наматывают бифилярно на каркас. Размеры каркаса в зависимости от назначения термопреобразователя могут быть от 60 до 100 мм. Каркас со спиралью из проволоки помещают в корпус защитной арматуры из коррозионно-стойкой стали. Провода прокладывают в керамических изоляторах и подсоединяют к зажимам головки термопреобразователя сопротивления.

Для измерения сопротивления термопреобразователей используют уравновешенные и неуравновешенные мосты и логометры.

Уравновешенные и неуравновешенные мосты. Измерительный мост состоит из четырех плеч, образованных сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 (рис. 2.39, а). В диагональ ab включен источник питания C , а в диагональ cd — измерительный прибор.

В основу работы измерительных мостов положены дифференциальный и нулевой методы. По дифференциальному методу ра-

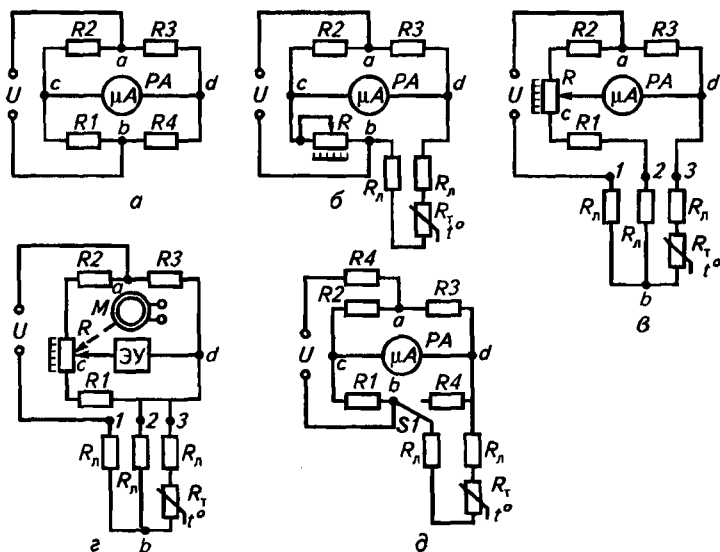


Рис. 2.39. Схемы измерительных мостов:

а — принципиальная; б — уравновешенного моста с двухпроводным включением термопреобразователя; в — уравновешенного моста с трехпроводным включением термопреобразователя; г — автоматического уравновешенного моста; д — неуравновешенного моста

ботаюи неуровновешенные показывающие мосты, а по нулево-му — уравновешенные (нулевые).

В измерительную диагональ уравновешенного моста включают измерительный прибор нуль-гальванометр PA , обладающий высокой чувствительностью при малых токах. В неуровновешенных мостах вместо гальванометра используют миллиамперметр.

Мост постоянного тока находится в равновесии при условии

$$R_1R_3 = R_2R_4. \quad (2.36)$$

В этом случае разность потенциалов в измерительной диагонали равна нулю. Если данное условие не соблюдается, то в измерительной диагонали протекает ток, определяемый сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 , сопротивлением гальванометра и напряжением источника U .

Сопротивление термопреобразователя R_T в уравновешенных мостах определяют включением его в одно из плеч моста и заменой R_1 переменным сопротивлением R . Равновесного состояния моста можно добиться, изменяя R (рис. 2.39, б).

Тогда сопротивление термопреобразователя

$$R_T = \frac{RR_3}{R_2} - R_n, \quad (2.37)$$

где R_n — линейное сопротивление соединительных проводов.

Каждой измеряемой температуре и значению R_T при постоянном сопротивлении проводов соответствует определенное положение переменного сопротивления R . Шкалу переменного сопротивления градуируют в градусах или при работе с неизвестным термопреобразователем в омах. Недостаток данной схемы: изменение сопротивления соединенных проводников воспринимается измерительным прибором как изменение температуры среды. Данный недостаток отсутствует в схеме, показанной на рисунке 2.39, в, в которой соединительные провода включены в смежные плечи моста. В этом случае равное изменение сопротивления обоих соединительных проводов не нарушает равновесия моста.

Для измерения температуры применяют и автоматические электронные уравновешенные мосты (рис. 2.39, г). Реверсивный двигатель M позволяет осуществлять автоматическое уравновешивание моста. В этой схеме вместо нуль-прибора включают электронный усилитель ($\mathcal{E}У$), на вход которого в случае нарушения равновесия поступает напряжение. Сигнал с выхода $\mathcal{E}У$ приводит во вращение в соответствующую сторону двигатель M , который перемещает движок реохорда до тех пор, пока не наступает равновесие моста.

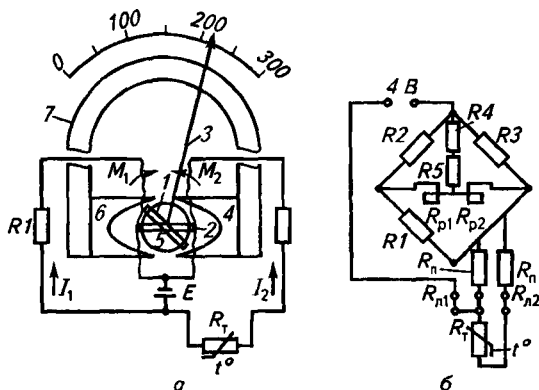
В неуравновешенном мосте (рис. 2.39, д) три плеча постоянны, а четвертое образовано измеряемым сопротивлением R_T . Напряжение питания моста при выполнении измерений поддерживают постоянным. Для его контроля периодически включают переключателем $S1$ контрольный резистор R_K и с помощью регулируемого резистора $R4$ устанавливают стрелку прибора PA на определенное деление. Ток в измерительной диагонали при $U_{cd} = \text{const}$ однозначно зависит от R_T . Следует отметить, что точность измерения температуры неуравновешенным мостом ниже, чем уравновешенным.

Логометры. Действие магнитоэлектрических логометров (рис. 2.40, а) основано на измерении отношения токов в двух электрических цепях. В одну из цепей включают постоянное сопротивление, а в другую — термометр сопротивления. Логометр состоит из двух рамок 1 и 2, которые жестко скреплены между собой и со стрелкой 3. Рамки помещены в воздушном зазоре между полюсными наконечниками 4 и 6 постоянного магнита 7 и сердечником 5. Зазор выполнен неравномерным, поэтому значение магнитной индукции в разных точках зазора, т. е. при различном угле поворота рамок и стрелки, будет неодинаковым. Воздушный зазор уменьшается от центра к краям полюсных наконечников, что вызывает увеличение магнитной индукции в зазоре также от центра к краям. Рамки логометра подключают к одному источнику питания постоянного тока таким образом, что вращающие моменты M_1 и M_2 направлены навстречу один другому. Изменение сопротивления термометра приводит к изменению тока в одной из рамок. При этом равновесие подвижной части нарушается, и рамка с большим током переместится в зону с меньшей напряженностью магнитного поля. Подвижная система поворачивается до тех пор, пока моменты, действующие на рамки, не сравняются. Шкалу логометров градуируют в градусах.

В электрической принципиальной схеме логометра (рис. 2.40, б)

Рис. 2.40. Схемы логометра:

а — кинематическая; б — электрическая принципиальная; 1, 2 — рамки; 3 — стрелка; 4, 6 — полюсные наконечники; 5 — сердечник; 7 — постоянный магнит



рамки, имеющие сопротивления R_{p1} и R_{p2} , включены в диагональ моста, образованного сопротивлением R_T и тремя постоянными резисторами $R1, R2, R3$. Для температурной компенсации прибора служит сопротивление $R5$, а для корректировки угла отклонения стрелки логометра — резистор $R4$. Помимо указанных сопротивлений в схему входят: $R_{л1}, R_{л2}$ — линейные сопротивления; $R_{п}$ — сопротивление для корректировки предела измерения моста.

Термопары. Они представляют собой спай из двух разнородных металлических проводников или полупроводников. Их действие основано на возникновении электрического тока в цепи из двух разнородных проводников (или полупроводников), если места их соединения (спаи) имеют различную температуру. Возникновение электрического тока обусловлено действием термоэлектродвижущей силы в результате диффузии свободных электронов из одного проводника в другой.

Один спай термопары, называемый рабочим, помещают в среду с температурой, подлежащей измерению, а температуру другого, нерабочего, спаи поддерживают постоянной. Таким образом, входная величина термопары — это температура рабочего спаи, а выходная — термоЭДС, которую термопара генерирует при постоянной температуре нерабочего спаи.

Для измерения термоЭДС термопар применяют потенциометры и милливольтметры.

В потенциометрах используют компенсационный метод, который заключается в уравнивании измеряемой величины известной разностью потенциалов от постоянного источника.

2.4.4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

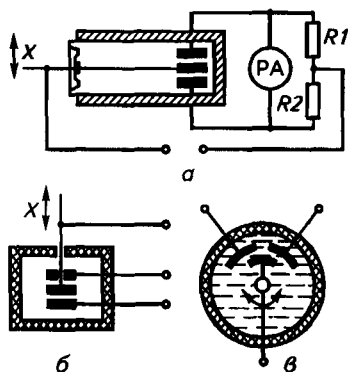
Электрохимические преобразователи представляют собой электролитическую ячейку, заполненную раствором с помещенными в нем двумя или несколькими электродами, служащими для включения преобразователя в измерительную цепь. Преобразователи используют для измерения состава и концентрации жидких и газообразных сред, давлений, перемещений, скоростей, ускорений и ряда других неэлектрических величин.

Действие электрохимического преобразователя основано на свойствах электролитической ячейки, включенной в электрическую цепь, генерировать ЭДС. Преобразователь характеризуется падением напряжения от проходящего тока, индуктивностью, емкостью и сопротивлением электрической цепи.

При измерениях выявляют зависимость между одним из этих электрических параметров и измеряемой неэлектрической величиной. Электрические параметры ячейки зависят от природы и состава раствора и электродов, температуры, химических превращений в ячейке, скорости перемещения в ней электролита и др.

Рис. 2.41. Электролитические преобразователи перемещения:

a — с одним подвижным средним электродом и двумя неподвижными; *б* — линейных перемещений; *в* — угловых перемещений; *X* — перемещение подвижного электрода



Связи между неэлектрическими величинами и электрическими параметрами электрохимических преобразователей определены законами электрохимии.

На рисунке 2.41 показаны электролитические преобразователи перемещения и схема их включения в мостовую измерительную цепь. На рисунке 2.41, *a* два плеча моста образованы сопротивлениями дифференциального электролитического преобразователя, имеющего один подвижный средний электрод и два неподвижных. На рисунке 2.41, *б* показан электролитический преобразователь линейных перемещений, а на рисунке 2.41, *в* — преобразователь угловых перемещений.

2.4.5. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

К *оптическим* измерительным преобразователям относят такие выпускаемые промышленностью элементы, как фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фотоэлементы. Их действие основано на фотоэффекте, который заключается в том, что под действием оптического электромагнитного излучения в твердом теле или жидкости освобождаются электроны — носители зарядов.

Фоторезистор. Он представляет собой полупроводниковый прибор, сопротивление которого меняется под действием света. Действие фоторезистора основано на внутреннем фотоэффекте, который заключается в перераспределении электронов по энергетическим состояниям, происходящем в конденсированных средах при поглощении света. По конструкции фоторезисторы представляют собой стеклянную пластинку с нанесенной на нее пленкой полупроводникового материала и покрытую слоем светопроницаемого лака.

К преимуществам фоторезисторов относят большой срок службы и высокую чувствительность, а к их недостаткам — большие инерционность и темновой ток.

Фотодиод. Он представляет собой открытую для доступа света пластинку полупроводника, в которой имеются области электронной и дырочной электропроводности, разделенные *p-n*-переходом. Для присоединения выводов, необходимых для включения фотодиода в схему, электронная и дырочная области снабжены контактами.

Под действием света на p - n -переход фотодиода происходит проникновение носителей зарядов из освещенной зоны в область p или n . По этой причине уменьшается обратное сопротивление фотодиода и изменяется сила тока в измерительной цепи.

Фотодиоды имеют малую постоянную времени меньше или равную 10^{-5} с, интегральную чувствительность менее 10 мА/лм и срок службы около 5 тыс. ч.

Фототранзистор. Он представляет собой монокристалл кремния или германия с тремя областями, имеющими различный характер проводимости и разделенными p - n -переходами, причем базовая область доступна для действия света. При освещении в базовой области образуются пары «электрон—дырка». Возникновение фототока обусловлено изменением количества зарядов в базовой области фототранзистора, образующихся под действием света. Вследствие этого увеличивается ток, инжектируемый в базу из эмиттерной области, и соответственно увеличивается ток во внешней цепи. Так как фототранзистор имеет оптический и электрический входы, то это позволяет осуществлять суммирование оптического и электрического входных сигналов.

Фотоэлементы. Действие электровакуумного фотоэлемента основано на внешнем фотоэффекте, заключающемся в испускании электронов с поверхности тела под действием электромагнитного излучения.

Выпускают газонаполненные и вакуумные фотоэлементы.

Следует отметить, что фотоэлементы с внешним фотоэффектом имеют малую выходную мощность и низкую чувствительность и их практически не применяют.

2.4.6. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Резисторы. Их изготавливают из металлической проволоки или металлокерамики с постоянным или переменным электрическим сопротивлением R . Переменные резисторы имеют контактное устройство, скользящее по проводящей поверхности.

Электрические конденсаторы. Они состоят из тонких металлических электродов (лент, пластин), разделенных слоем диэлектрика. Основная характеристика конденсатора — электрическая емкость C , равная отношению заряда на одном из электродов к разности потенциалов U между ними.

Полупроводниковые диоды. Они представляют собой двухэлектродные приборы, обладающие способностью хорошо пропускать электрический ток одного направления и плохо — ток противоположного направления. *Полупроводниковый диод* — это пластинка с двумя областями разной проводимости: электронной (n -типа) и дырочной (p -типа). Границу, разделяющую эти области, называют p - n -переходом. Область n -типа — отрицательный

электрод (катод), область p -типа — положительный электрод (анод) диода. Диод хорошо пропускает ток при соединении его отрицательного электрода с отрицательным полюсом источника, а положительного — с положительным полюсом. При обратной полярности приложенного напряжения сопротивление диода велико, а ток, называемый обратным, очень мал по сравнению с прямым током.

Транзисторы. Они представляют собой трехэлектродные полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний различных частот.

Наиболее распространенный *биполярный транзистор* — это пластинка германия, кремния или другого полупроводника, обладающего электронной n -типа или дырочной p -типа проводимостью, в которой созданы две области разного объема. Механизм проводимости этих областей противоположен механизму проводимости пластинки. Каждая область совместно с пластинкой обладает свойствами полупроводникового диода. Если пластинка полупроводника обладает проводимостью n -типа, транзистор имеет структуру $p-n-p$; если p -типа, то транзистор имеет структуру $n-p-n$. Пластинку полупроводника называют базой (Б), область меньшего объема — эмиттером (Э), а область большего объема — коллектором (К).

Условные графические изображения транзисторов показаны на рисунке 2.42. Стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор: в транзисторе структуры $p-n-p$ — от эмиттера к базе; в транзисторе $n-p-n$ — от базы к эмиттеру.

Транзисторы структур $p-n-p$ и $n-p-n$ называют биполярными, так как в их работе участвуют и положительные носители зарядов — «дырки», и отрицательно заряженные электроны. Биполярные транзисторы — это усилительные и ключевые приборы универсального назначения, их применяют, например в электронных усилителях.

Наряду с биполярными применяют униполярные (*полевые транзисторы*), в которых работают носители только одного знака. Управляют таким транзистором с помощью электрического поля, создаваемого вспомогательным электродом-затвором. Этот тип транзисторов обладает большим входным сопротивлением.

Тиристоры. Они представляют собой четырехэлектродные полупроводниковые приборы, используемые для преобразования переменного тока в постоянный, регулирования мощности переменного тока и переключения электрических цепей различной мощности.

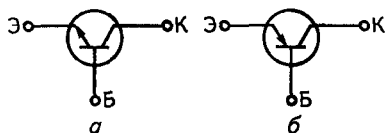


Рис. 2.42. Условные обозначения транзисторов:

а — транзистор $p-n-p$; *б* — транзистор $n-p-n$

Тиристор характеризуется двумя устойчивыми состояниями: высокой (открыт) и низкой проводимости (закрыт). Воздействие электрического напряжения или тока на тиристор приводит к переводу его из закрытого состояния в открытое.

Промышленность выпускает несколько типов тиристоров. Наибольшее распространение получили тиристоры с двумя выводами (динисторы) и тремя выводами (тринисторы).

Динистор — это пластинка полупроводника с четырьмя чередующимися слоями различной электрической проводимости, образующими три p - n перехода — Π_1 , Π_2 , Π_3 .

Два крайних слоя пластинки с дырочной проводимостью p -типа и электронной проводимостью n -типа называют соответственно анодом и катодом.

Тринистор, кроме того, имеет управляющий электрод, который представляет собой третий вывод от одного из средних слоев пластинки.

На рисунке 2.43 показаны схемы включения и условные графические обозначения динистора и тринистора.

Для перехода динистора из закрытого состояния в открытое напряжение между анодом и катодом U_{np} должно достичь некоторой величины $U_{пер}$, называемой напряжением переключения. При отключении питающего напряжения в цепи нагрузки $R1$ или снижении тока до уровня, называемого током выключения, динистор переходит из открытого состояния в закрытое.

У тринистора напряжение переключения $U_{пер}$, при котором прибор переходит из закрытого в открытое состояние, меньше, что достигается подачей управляющего тока I_y от источника напряжения U_y на управляющий электрод $У$. Отключение тринистора происходит при изменении полярности напряжения или уменьшении протекающего через него прямого тока I_{np} до значения, меньшего тока включения.

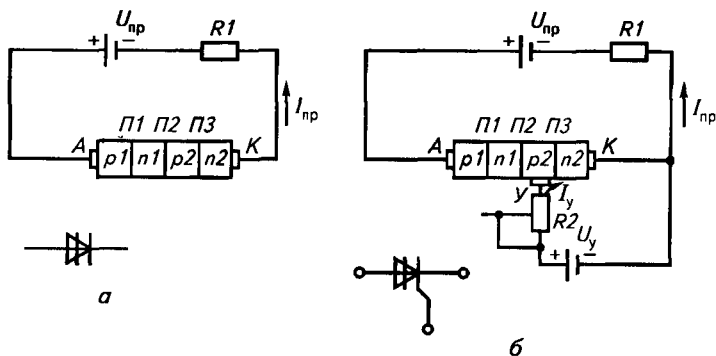


Рис. 2.43. Схема включения и условные графические обозначения динисторов (а) и тринисторов (б)

Промышленность выпускает также *симисторы*, представляющие собой симметричные тиристоры, в которых имеется возможность управлять переключением цепи переменного тока в течение положительного и отрицательного полупериодов переменного напряжения.

2.4.7. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Усилительные устройства предназначены для увеличения мощности входного сигнала. Усиление в них происходит за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала усилителя. При этом управляющее воздействие на усилительный элемент — это входной сигнал.

Параметры усилителя: коэффициент усиления, быстродействие, стабильность, потребляемая и выходная мощности, а для электронных усилителей еще входное и выходное сопротивление.

Коэффициент, показывающий, во сколько раз выходной сигнал усилителя больше сигнала на его входе, называют коэффициентом усиления.

В сельскохозяйственном производстве в автоматических системах применяют электромеханические, электронные, магнитные, гидравлические и пневматические усилители.

Электромеханические усилители. К ним относят электромагнитные реле, магнитные пускатели, командоаппараты и т. п. В этих аппаратах мощность, напряжение и ток, потребляемые обмоткой катушки при срабатывании, значительно меньше мощности, напряжения и тока в управляемой контактами цепи. Их преимущество — простота устройства, доступность, низкая стоимость и широкие пределы по входным и выходным величинам; недостатки — наличие контактов и подвижных частей, нелинейность характеристики.

Электронные усилители. По элементной базе их подразделяют на полупроводниковые и ламповые.

Полупроводниковые усилители благодаря развитию производства полупроводниковых элементов нашли широкое применение в схемах автоматики. Их коэффициент усиления $10^3 \dots 10^6$, а выходная мощность достигает нескольких киловатт. К преимуществам полупроводниковых усилителей относят высокую надежность и КПД, значительный срок службы, малые габариты и массу.

Полупроводниковые усилители обладают виброустойчивостью. В то же время они имеют температурную нестабильность и разброс характеристик.

Схема простейшего транзисторного усилителя показана на рисунке 2.44. В транзисторных усилителях транзисторы часто включают по схеме с общим эмиттером, т. е. способом, при котором

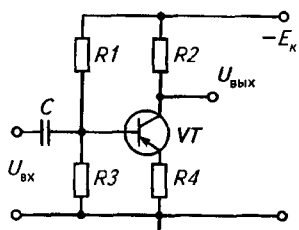


Рис. 2.44. Схема усилителя с биполярным транзистором $p-n-p$:

$U_{вх}$ — входное напряжение; $U_{вых}$ — выходное напряжение;
 E_k — напряжение источника питания

эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей усилителя для переменному току. Такое включение транзистора обеспечивает наибольшее усиление сигнала по мощности.

На вход усилителя подается напряжение $U_{вх}$, а выходное напряжение снимается с участка коллекторной цепи, в которую включено сопротивление нагрузки $R2$. Включение транзистора осуществлено по схеме с общим эмиттером. Источник питания положительным полюсом соединен с эмиттером, а отрицательным — с коллектором через $R2$, так как в усилителе использован транзистор структуры $p-n-p$.

Делитель напряжения, состоящий из резисторов $R1$, $R3$, задает режим работы усилительного каскада по постоянному току. Напряжение смещения, подаваемое на базу транзистора (для германиевых транзисторов $0,1...0,2$ В, для кремниевых $0,6...0,7$ В), открывает транзистор, устанавливая его в режим усиления.

Разделительный конденсатор C , с одной стороны, соединяет источник входного сигнала с базовой цепью транзистора по переменному току, а с другой — препятствует поступлению постоянного тока от источника питания в цепь источника входного сигнала. Резистор $R4$ в цепи эмиттера служит для повышения температурной стабильности работы усилительного каскада.

При подаче на вход усилителя переменного напряжения $U_{вх}$ ток базы будет изменяться по тому же закону. Одновременно будет изменяться коллекторный ток и соответственно напряжение $U_{вых}$ на сопротивлении нагрузки $R2$.

От сопротивления $R3$ в основном зависит входное сопротивление усилителя, а от сопротивления резистора $R2$ и коэффициента усиления транзистора — его выходное напряжение.

Если к выходу усилителя подключить вход второго усилителя, то будет получен двухкаскадный усилитель, коэффициент усиления которого равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов.

Важная роль в усилительных устройствах автоматики принадлежит операционным усилителям, на основе которых можно не только создавать широкий класс усилителей слабых сигналов с датчиков различных физических величин, но и получать требуемые законы регулирования, используемые в автоматических регуляторах.

Операционный усилитель — это усилитель постоянного тока,

имеющий большой коэффициент усиления по напряжению ($10^4 \dots 10^5$ и более), высокое входное сопротивление ($10^5 \dots 10^7$ Ом и более), широкий спектр усиливаемых частот от 0 Гц до единиц мегагерц и более. Выполненные по интегральной технологии в виде микросхем операционные усилители намного превосходят по точности, универсальности применения и надежности схемы на транзисторах.

На рисунке 2.45 приведена схема включения операционного усилителя (на схемах он имеет обозначение DA). Операционный усилитель имеет два входа: инвертирующий $U_{вх1}$, обозначаемый на схеме кружком, и неинвертирующий $U_{вх2}$, которые образуют дифференциальный вход, а также один выход $U_{вых}$, к которому подключают сопротивление нагрузки R_H . Для усиления сигналов обеих полярностей питание операционного усилителя осуществляют от двух источников питания $\pm E_n$. Подача входного сигнала и снятие сигнала на выходе усилителя происходит относительно нулевой шины. Операционные усилители в большинстве случаев используют с цепями обратной связи, определяющими свойства и параметры синтезируемых на их основе схем. На основе операционных усилителей можно создавать, например, схемы, выполняющие математические операции: сложение, вычитание, деление, интегрирование и дифференцирование, сравнение и др., а также много других схем, используемых в автоматике. Приведем некоторые из них.

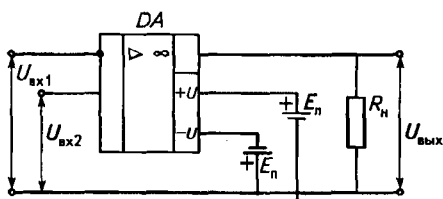


Рис. 2.45. Схема включения операционного усилителя

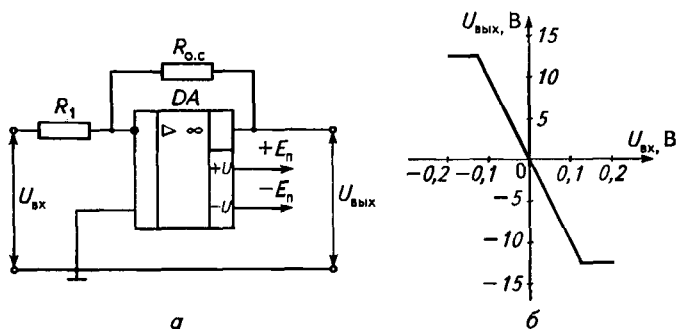


Рис. 2.46. Схема инвертирующего усилителя (а) и его передаточная характеристика (б)

На рисунке 2.46, а приведена схема *инвертирующего усилителя*, а на рисунке 2.46, б пример его передаточной характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Коэффициент усиления по напряжению данной схемы равен отношению сопротивлений обратной связи $R_{\text{о.с}}$ и входного R_1 : $k_{и.у} = -R_{\text{о.с}}/R_1$, выбирая которые можно задать требуемый коэффициент усиления схемы. Из передаточной характеристики видно, что при подаче входного напряжения одной полярности усиленный сигнал на его выходе имеет противоположную полярность, т. е. происходит инвертирование входного сигнала. В данном случае коэффициент усиления на линейном участке характеристики имеет значение -100 .

На рисунке 2.47 приведена схема *суммирующего усилителя*. Входное напряжение сумматора равно $U_{\text{вых}} = -(U_{\text{вх1}}/R_1 + U_{\text{вх2}}/R_2)R_{\text{о.с}}$. Из формулы видно, что входные сигналы можно суммировать с требуемым коэффициентом усиления. Главным достоинством сумматора является то, что суммирование происходит без взаимных помех источников сигналов $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$.

На рисунке 2.48 приведена схема *интегрирующего усилителя*. При напряжении на конденсаторе $U_C = 0$ в момент времени $t = 0$ напряжение на выходе интегратора равно $U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt$, т. е.

данная схема выполняет математическую операцию интегрирования.

Магнитные усилители. Они представляют собой электрические аппараты, сигналы в которых усиливаются управляемым индуктивным сопротивлением. Их применяют в схемах автоматики ввиду простоты устройства, большого срока службы, высоких КПД и надежности.

К преимуществам магнитных усилителей относят большой коэффициент усиления (до 10^5), отсутствие подвижных частей, нечувствительность к температурным, ударным и вибрационным воздействиям, большую мощность выходного сигнала, а к недостаткам — большие габариты, массу и инерционность. Вследствие инерционности магнитные усилители можно применять только для усиления низкочастотных сигналов.

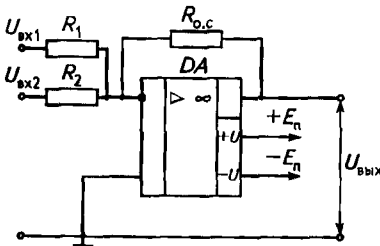


Рис. 2.47. Схема суммирующего усилителя

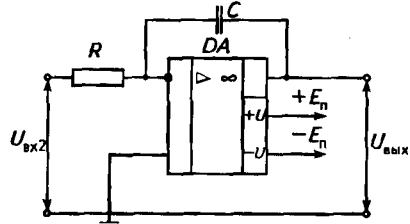


Рис. 2.48. Схема интегрирующего усилителя

Гидравлические и пневматические усилители. Их применяют в САР сельскохозяйственной техники, в которых усиление осуществляется за счет перемещения исполнительного органа энергией внешнего источника. Введение в них внутренних обратных связей позволяет получить пропорциональную зависимость между входной и выходной величинами.

По конструктивному исполнению гидравлические и пневматические усилители имеют много общего и отличаются только энергоносителем, в качестве которого в гидравлических усилителях используют жидкость под высоким давлением, а в пневматических — газ.

В пневматических усилителях вследствие сжимаемости газа и воздуха появляется зона нечувствительности, которая приводит к ухудшению статических и динамических характеристик.

К преимуществам гидравлических и пневматических усилителей относят высокий коэффициент усиления (до 10^6), простоту устройства, высокую выходную мощность (до 100 кВт), нечувствительность к тряске и вибрациям, а к недостаткам — необходимость промежуточного источника энергии для создания давления в гидро- или пневмосистеме.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип действия основных элементов электроники, применяемых в системах автоматизации сельского хозяйства. 2. Дайте определение усилительного устройства. 3. Какие усилительные устройства применяют в сельскохозяйственном производстве? 4. Поясните назначение элементов усилительного каскада на транзисторе и опишите его работу. 5. Дайте определение операционного усилителя и укажите области его применения. 6. Опишите принцип действия основных схем, выполненных на базе операционного усилителя.

2.5. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Создание САР технологических процессов состоит из трех основных этапов.

1. Исследование объекта управления в целях получения его математической модели.

2. Синтез системы управления или в частном случае выбор и расчет автоматического регулятора.

3. Анализ замкнутой системы управления на устойчивость и качество работы.

На *первом этапе* проектирования САР главное — определение свойств ОУ и математическое описание функционирования ОУ. Это позволяет оценивать (прогнозировать) информацию об изменении состояния объекта при приложении к нему внешних воздействий.

На *втором этапе*, исходя из результатов исследования ОУ, составляют функциональную схему САР. Как правило, ОУ, а также основные узлы системы, такие, как устройство измерения, устройство воздействия и др., заранее известны. Тогда задача синтеза САР заключается в выборе и расчете автоматического регулятора. В состав типового автоматического регулятора уже входит корректирующее устройство, предназначенное для получения требуемых показателей качества регулирования.

Третий этап проектирования связан с анализом работы САР в переходном и установившемся режимах. Наиболее важное на этом этапе — определение устойчивости системы, когда после внешнего воздействия отклонение выходной величины $y(t)$ от заданного значения g_0 со временем должно уменьшаться. На этом же этапе определяют качество процесса регулирования, показывающее, насколько процесс регулирования в реальной САР близок заданному. В случае необходимости в схему САР вводят дополнительные корректирующие устройства и обратные связи.

2.6. ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Как было сказано выше, проектирование САР начинают с выбора и исследования ОУ. При *выборе* ОУ выясняют, достаточен ли уровень механизации и электрификации рабочих машин, составляющих основу автоматизируемого технологического процесса. При *исследовании* ОУ прежде всего анализируют входные и выходные величины, а также внешние воздействия, имеющие место при функционировании ОУ. Для этого можно воспользоваться моделью ОУ в виде «черного ящика». Рассмотрим выбор указанных величин на примере системы регулирования микроклимата животноводческого помещения.

После того как выбраны управляемые величины, необходимо определить управляющие воздействия. Как правило, этот вопрос решают технологи и энергетики. Чтобы обеспечить заданную температуру, необходим обогрев помещения в зимнее время и его охлаждение в летний период.

После выявления управляющих воздействий необходимо выявить возмущающие воздействия. Их необходимо разбить на две группы: контролируемые (которые возможно и целесообразно измерять) и неконтролируемые (которые измерять невозможно или нецелесообразно). На температуру в помещении влияют контролируемые факторы (наружная температура f_1 , скорость ветра f_2) и неконтролируемые (открывание дверей и ворот v_1 , изменение тепловыделений животных v_2). На влажность воздуха внутри помещения влияют влажность наружного воздуха f_3 и выделение влаги животными v_3 .

Далее определяют свойства ОУ, которые достаточно полно опи-

ссылаются статическими и динамическими характеристиками, рассмотренными в подразделе 2.2. На их основе можно построить математическую модель ОУ и обосновать в дальнейшем выбор автоматического регулятора. Поскольку объектом управления могут быть как весь ТП, так и его отдельные операции и установки, то сначала определяют статические и динамические характеристики отдельных звеньев, а затем и всего ОУ в целом. Для этого ТП разбивают на отдельные части, соответствующие законченным технологическим операциям, например, таким как предварительная очистка или пастеризация молока в ТП первичной переработки молока.

По результатам исследования ОУ формулируют алгоритм функционирования САР (подраздел 2.1.1) и составляют ее функциональную схему, которая позволяет представить нормальный ход процесса регулирования, выявить причины отклонений регулируемой величины и определить наилучшие варианты построения автоматической системы.

Затем формулируют алгоритм регулирования САР. Так, если в соответствии с алгоритмом функционирования требуется поддерживать в животноводческом помещении постоянную температуру в пределах 16 ± 2 °С, то система регулирования должна отключать нагрев при достижении температуры 18 °С и включать его снова при снижении температуры до 14 °С.

После этого выбирают систему регулирования по виду применяемой энергии (электрическая, пневматическая или гидравлическая) и в соответствии с этим выбирают промышленные приборы и средства автоматизации, на базе которых будет строиться автоматический регулятор. Выбор автоматического регулятора включает в себя выбор закона управления, его типа и технических характеристик с учетом особенностей ТП. При технической реализации САР целесообразно максимально использовать унифицированные блоки, узлы и оборудование, что обеспечивает большую надежность и ремонтпригодность САР. Затем формулируют требования к качеству переходных процессов: длительности, максимальному динамическому отклонению, колебательности и т. д. Эти требования должны определяться технологией. Если таких требований сформулировать не удается, то используют интегральные показатели качества.

И в заключение формулируют требования к точности системы. Они также определяются технологическим процессом. При повышенных требованиях к точности рекомендуется применять астатические системы. Надо помнить, что повышение точности часто ведет к неустойчивости системы.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте основные этапы построения систем автоматизации сельскохозяйственного назначения. 2. Какова методика выбора и исследования объекта управления?

2.7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

2.7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Как указывалось в подразделе 2.1, задача системы автоматического регулирования — поддержание регулируемой величины на заданном уровне. Эту функцию в САР выполняет *автоматический регулятор (АР)*. Автоматические регуляторы классифицируют в зависимости от назначения, принципа действия, вида используемой энергии, конструктивного исполнения и др.

По виду регулируемого параметра АР подразделяют на регуляторы расхода, температуры, освещенности, давления, уровня и др.

В зависимости от источника используемой энергии выделяют регуляторы прямого и непрямого (косвенного) действия.

Регуляторы, в которых для перемещения регулирующего органа используется энергия регулируемой среды, называют регуляторами *прямого действия*. Поэтому для функционирования САР с регулятором прямого действия внешний источник энергии не требуется. В регуляторах *непрямого действия* для работы и воздействия на управляющий орган необходим внешний источник энергии.

В зависимости от вида используемой энергии АР непрямого действия подразделяют на электрические (электромеханические и электронные), пневматические, гидравлические, комбинированные, например электрогидравлические и др.

По характеру воздействия АР на ОУ различают регуляторы непрерывного и дискретного (прерывистого) действия. В регуляторах *непрерывного* действия при непрерывном изменении входной величины выходная величина также изменяется непрерывно. В регуляторах *дискретного* действия при непрерывном изменении входной величины выходная величина изменяется дискретно (прерывисто) в определенные моменты времени, в интервалах между которыми регулирующее воздействие постоянно. Регуляторы дискретного действия дополнительно подразделяют на *импульсные, цифровые и релейные*. В цифровых регуляторах, созданных, например, на базе микроконтроллеров, используют алгоритмы, заложенные в память микроконтроллера, с применением цифровых методов обработки информации.

В зависимости от того, какой закон управления или какая их комбинация положена в основу алгоритма работы автоматического регулятора с исполнительными механизмами постоянной скорости, различают пропорциональные (П), дифференциальные (Д), интегральные (И), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы.

По конструктивному исполнению АР подразделяют на аппаратные, приборные, агрегатные и модульные.

В *аппаратных* АР в одном корпусе расположены основные узлы регулятора: устройство измерения, задающее устройство, устройство сравнения, усилительно-преобразовательное устройство за исключением датчика и исполнительного устройства. За счет сменных устройств измерения и датчика можно осуществить регулирование различных физических величин на ОУ. К таким регуляторам относят аналоговые регуляторы ПТР-2, ПТР-3, цифровые регуляторы типа ТРМ201, ТРМ101 и др.

В *приборных* автоматических регуляторах сигнал рассогласования между заданным и действительным значениями регулируемой величины подается от вторичного измерительного прибора (мост, логометр и др.), встроенного в конструкцию регулятора. Это позволяет не только контролировать значение регулируемой величины, но и формировать сигнал управления для исполнительного устройства.

В *агрегатных* автоматических регуляторах функциональные блоки выполнены в виде отдельных конструктивных модулей, имеющих унифицированные входные и выходные сигналы. Простым сочетанием стандартных взаимозаменяемых устройств можно реализовать основные законы регулирования.

Модульные автоматические регуляторы также состоят из отдельных модулей, каждый из которых выполняет только простейшие операции, такие, как усиление, сглаживание, ограничение и др. Это позволяет конструировать АР для широкого круга задач. По такому принципу построены пневматические регуляторы «Старт».

2.7.2. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Воздействие регулятора на объект управления в целях поддержания требуемого значения регулируемой величины осуществляется по определенному закону, положенному в основу алгоритма работы автоматического регулятора.

Законом регулирования называют математическую зависимость $u(t) = f(\varepsilon(t))$ между управляющим воздействием регулятора $u(t)$ (выходным сигналом регулятора) и отклонением $\varepsilon(t)$ действительного значения регулируемой величины y от заданного значения g_0 (входным сигналом регулятора). В результате преобразования блоками ЗУ и УИ сигналов g_0 и $y(t)$ в сигналы одной физической природы, например в электрическое напряжение, получим на выходе устройства сравнения $\varepsilon(t) = x_0 - x_1$ (функциональная схема на рис. 2.3).

Рассмотрим основные законы регулирования, используемые в промышленных регуляторах. Предположим, что в САР использованы устройства воздействия в виде исполнительных механизмов с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа.

Пропорциональный закон регулирования

$$u(t) = k_p \varepsilon(t),$$

где k_p — коэффициент передачи (усиления), являющийся параметром настройки регулятора, $k_p = u_1/\varepsilon_1$; u_1 — сигнал на выходе регулятора; ε_1 — величина входного воздействия.

Этот закон можно реализовать на основе *П-регулятора*, обеспечивающего управляющее воздействие, пропорциональное отклонению регулируемой величины от заданного значения (рис. 2.49, а).

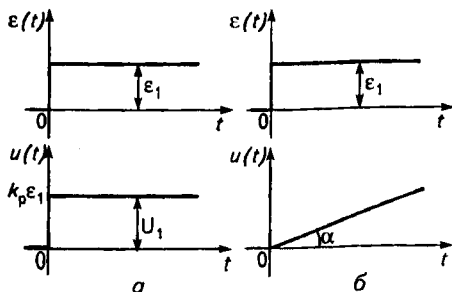
К преимуществам П-регулятора относят быстродействие и простоту его реализации. Благодаря малой инерционности регулятора обеспечивается незначительное отклонение регулируемой величины в начале переходного процесса (динамическая ошибка). САР с таким регулятором обладает значительной устойчивостью, что позволяет использовать его с ОУ без самовывравнивания. Однако при работе П-регулятора возникает *установившаяся статическая ошибка* Δ_0 , приводящая к остаточному отклонению регулируемого параметра (подраздел 2.3.2). При настройке П-регулятора с увеличением коэффициента передачи k_p статическая ошибка уменьшается, но уменьшается и устойчивость САР. Передаточная функция регулятора соответствует пропорциональному (усилительному) звену

$$W(p) = U(p)/\varepsilon(p) = k_p. \quad (2.38)$$

Интегральный закон регулирования

$$u(t) = k_p \int_0^t \varepsilon(t) dt,$$

где k_p — коэффициент передачи (усиления).



Если входная и выходная величины в последней формуле имеют одинаковую размерность, то коэффициент k_p

Рис. 2.49. Временные характеристики регуляторов:

а — пропорционального; б — интегрального; $\varepsilon(t)$ — сигнал на входе регулятора; $u(t)$ — сигнал на выходе регулятора

имеет размерность 1/с. Тогда можно записать

$$u(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \varepsilon(t) dt,$$

где $T_{\text{и}}$ — постоянная времени интегрирования, $T_{\text{и}} = 1/k_{\text{р}}$.

Постоянная времени интегрирования — это время, в течение которого с момента поступления на вход регулятора постоянного воздействия ε_1 сигнал на выходе регулятора достигает значения, равного значению входного сигнала.

Регулятор с таким законом управления (*И-регулятор*) воздействует на ОУ пропорционально интегралу от отклонения регулируемой величины ε_1 (рис. 2.49, б).

Угол наклона прямой $u(t)$ к оси абсцисс равен $\alpha = \text{arctg} k_{\text{р}} \varepsilon_1$. Управляющее воздействие регулятора будет осуществляться до тех пор, пока отклонение регулируемой величины не станет равным нулю. Тем самым статическая ошибка Δ_0 , свойственная П-регулятору, устраняется. Таким регуляторам присущи большая динамическая ошибка и невысокое быстродействие, особенно в начальной части переходного процесса, поскольку в момент входного воздействия И-регулятор из-за своих инерционных свойств не успевает выработать значительный управляющий сигнал. Их не применяют с ОУ без самовыравнивания. Увеличивая при регулировке коэффициент передачи $k_{\text{р}}$, можно уменьшить динамическую ошибку и время регулирования, но при этом устойчивость САУ уменьшается. Передаточная функция И-регулятора соответствует интегрирующему звену

$$W(p) = U(p)/\varepsilon(p) = k_{\text{р}}/p = 1/T_{\text{и}}p.$$

Пропорционально-интегральный закон регулирования

$$u(t) = k_{\text{р}}\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \varepsilon(t) dt, \quad (2.39)$$

где $k_{\text{р}}$ — коэффициент передачи, $T_{\text{и}}$ — постоянная времени интегрирования, являющиеся параметрами настройки регулятора.

Этот закон можно реализовать на основе *ПИ-регулятора*. Он воздействует на объект пропорционально как отклонению регулируемой величины, так и интегралу от этого отклонения. Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W_{\text{ПИ}}(p) = U(p)/\varepsilon(p) = k_{\text{р}} + 1/(T_{\text{и}}p). \quad (2.40)$$

В динамическом отношении ПИ-регулятор эквивалентен П-регулятору с передаточной функцией $W_n(p) = k_p$ и И-регулятору с передаточной функцией $W_n(p) = 1/T_{из}p$, соединенным параллельно (рис. 2.50, а).

На рисунке 2.51 показан график изменения регулирующего воздействия $u(t)$ при скачкообразном отклонении входного воздействия на величину ϵ_1 (линия 1).

В начальный момент ПИ-регулятор мгновенно перемещает исполнительный механизм на величину $k_p \epsilon_1$, пропорциональную отклонению ϵ_1 , после чего регулирующий орган исполнительного механизма регулятора дополнительно перемещается в ту же сторону со скоростью $\epsilon_1/T_{из}$, пропорциональной отклонению регулируемой величины. ПИ-регулятор со структурной динамической схемой, показанной на рис. 2.50, а, и передаточной функцией (2.40) имеет независимые друг от друга параметры настройки k_p и $T_{из}$.

Кроме схемы ПИ-регулятора, показанного на рисунке 2.50, а, на практике широко применяют структурную динамическую схему ПИ-регулятора, представленную на рисунке 2.50, б. В этой схеме реализуется закон регулирования вида

$$u(t) = k_p \epsilon(t) + \frac{k_p}{T_{из}} \int_0^t \epsilon(t) dt. \quad (2.41)$$

Постоянную времени интегрирования в таком регуляторе принято называть *постоянной времени изодрома* или *временем изодрома* $T_{из}$. Передаточная функция для схемы на рисунке 2.50, б будет иметь вид

$$W(p) = U(p)/\epsilon(p) = k_p + k_p/(T_{из}p). \quad (2.42)$$

Таким образом, ПИ-регулятор со структурной динамической схемой, представленной на рисунке 2.50, б, имеет взаимосвязанные параметры настройки статической и астатической частей по

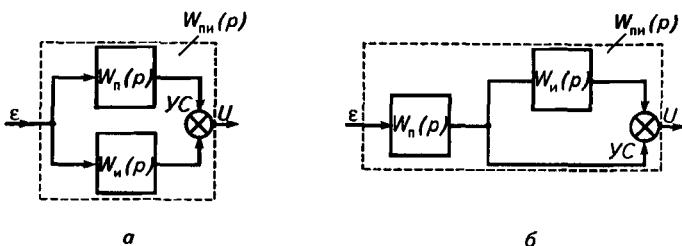


Рис. 2.50. Структурные динамические схемы ПИ-регуляторов:

а — с передаточной функцией по формуле (2.40); б — с передаточной функцией по формуле (2.42)

Рис. 2.51. Временные характеристики ПИ-регуляторов при одинаковых значениях k_p :

1 — с передаточной функцией по формуле (2.40); 2 — с передаточной функцией по формуле (2.42)

коэффициенту передачи k_p , поскольку при настройке коэффициента k_p изменяется и постоянная времени интегрирования $T_{и} = T_{из}/k_p$. На рисунке 2.51 (линия 2) показан характер изменения интегральной составляющей ПИ-закона регулирования по формуле (2.42) (коэффициенты передачи k_p для обеих схем одинаковы). Вклад в регулирующее воздействие пропорциональной части составляет $k_p \epsilon_1$, а интегральная составляющая изменяется по линейному закону с углом наклона $\alpha_2 = \text{arctg} k_p \epsilon_1 / T_{из}$. Как видно из графика, время изодрома $T_{из}$, за которое пропорциональная составляющая удваивается за счет интегральной составляющей, можно определить при двойном значении $k_p \epsilon_1$.

На рисунке 2.52 показан характер изменения ПИ-законов регулирования по формулам (2.39) и (2.41) при различных значениях коэффициентов передачи k_p , причем $k_{p2} > k_{p1}$ (линии 1 и 2). Как видно из графиков, на рисунке 2.52, а скорость нарастания интегральной составляющей на выходе регулятора, имеющего закон регулирования по формуле (2.39), при увеличении k_p не изменяется ($\alpha_1 = \alpha_2$), а на рисунке 2.52, б — скорость нарастания интегральной составляющей закона по формуле (2.41) увеличивается ($\alpha_2 > \alpha_1$).

ПИ-регулятор сочетает в себе преимущества П-регулятора и И-регулятора, поэтому его широко применяют в САР. В случае отказа интегральной составляющей ПИ-регулятор будет работать как П-регулятор, что повышает надежность его работы.

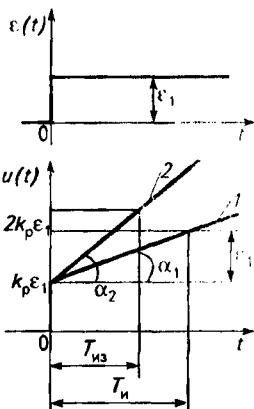
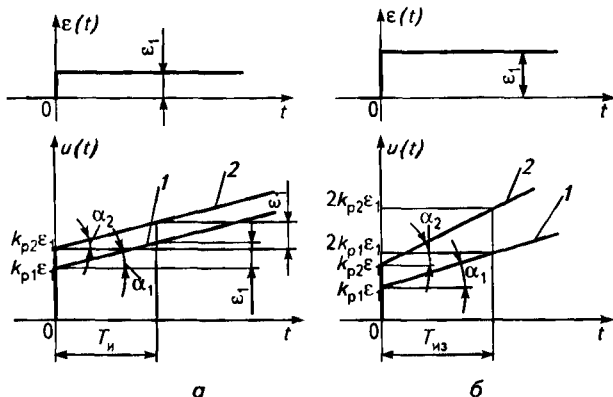


Рис. 2.52. Временные характеристики ПИ-регуляторов при различных значениях k_p :

а — с передаточной функцией по формуле (2.40); б — с передаточной функцией по формуле (2.42); 1 — при коэффициенте передачи k_{p1} ; 2 — при $k_{p2}, k_{p2} > k_{p1}$



На основе ПИ-регулятора можно реализовать законы П- и И-регулирования, а также позиционный закон регулирования, при котором регулятор имеет характеристику релейного элемента (см. рис. 2.57, б).

Если в ПИ-регуляторе установить большое значение постоянной времени интегрирования ($T_{из} \rightarrow \infty$), то его характеристика приобретает вид переходной характеристики П-регулятора (рис. 2.53, а). Если же установить $k_p \rightarrow 0$, то регулятор будет реализовывать И-закон регулирования (рис. 2.53, б). А если в ПИ-регуляторе принять $T_{из} = 0$, а $k_p \approx \infty$ (рис. 2.53, в), то выходной сигнал регулятора при любом малом входном воздействии сразу установится в одно из крайних положений: наибольшее или наименьшее значения, т. е. исполнительный механизм переместит регулирующий орган в одно из положений «Открыто» или «Закрыто», что соответствует позиционному закону регулирования (рис. 2.53, г).

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования

$$u(t) = k_p \varepsilon(t) + \frac{k_p}{T_{из}} \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_p T_{пр} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (2.43)$$

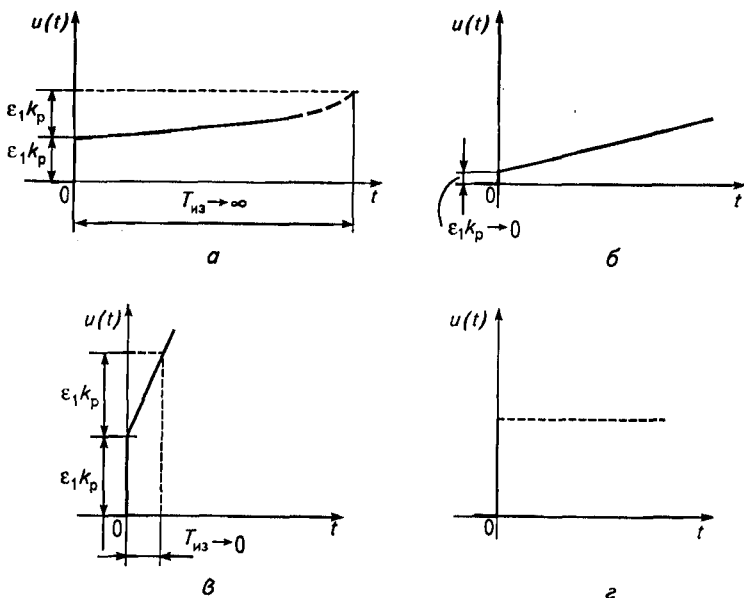


Рис. 2.53. Временные характеристики ПИ-регуляторов при различных значениях k_p и $T_{из}$:

а — $T_{из} \rightarrow \infty$; б — $k_p \rightarrow 0$; в — $k_p \rightarrow \infty$, $T_{из} \rightarrow 0$; г — переход ПИ-закона в релейный режим

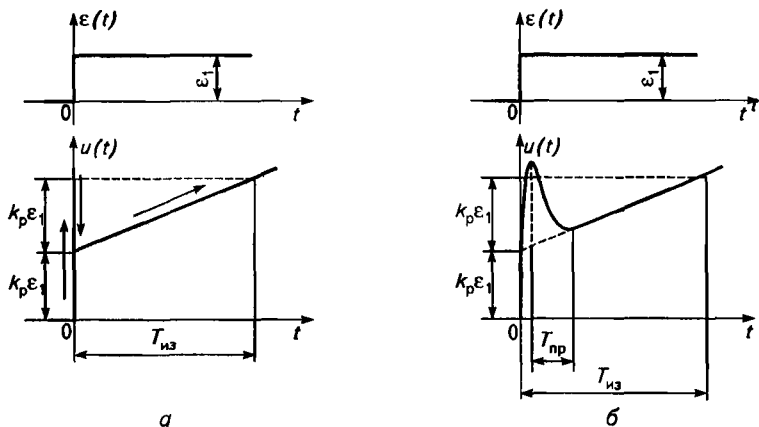


Рис. 2.54. Временные характеристики ПИД-регулятора при входном воздействии ϵ_1 :
 а — идеальный регулятор; б — реальный регулятор

Этот закон можно реализовать на основе *ПИД-регулятора*, имеющего три параметра настройки: k_p , $T_{из}$ и $T_{пр}$, где $T_{пр}$ — *постоянная времени дифференцирования (время предварения)*. Регулирующее воздействие пропорционально отклонению, интегралу и первой производной (скорости изменения) регулируемой величины. Последняя составляющая улучшает переходной процесс, ускоряя его в первый момент времени, предваряя отклонение регулируемой величины, не давая ей существенно измениться. В этот промежуток времени для компенсации отклонения исполнительный механизм перемещает регулирующий орган, например поворотную заслонку, на больший угол, чем в случае отсутствия в законе регулирования дифференциальной составляющей.

На рисунке 2.54, а и б приведены графики изменения регулирующего сигнала $u(t)$ при скачкообразном отклонении входного воздействия на величину ϵ_1 для идеального (а) и реального (б) регуляторов.

При скачкообразном изменении регулируемой величины, когда скорость ее изменения максимальна, регулятор сначала оказывает большое воздействие на ОУ [начальная часть кривой $u(t)$] за счет дифференциальной составляющей, затем величина воздействия падает до значения, определяемого пропорциональной составляющей (приблизительно $u_1 = k_p \epsilon_1$), а после этого начинает действовать интегральная составляющая управляющего воздействия (возрастающая часть кривой). Из графика можно определить значения $k_p = u_1/\epsilon_1$, $T_{из}$ и $T_{пр}$.

Передаточная функция ПИД-регулятора соответствует параллельному соединению усилительного, интегрирующего и диффе-

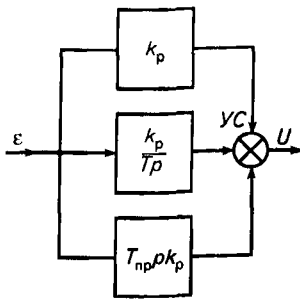


Рис. 2.55. Структурная схема ПИД-регулятора

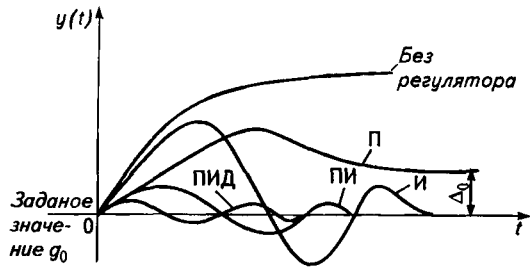


Рис. 2.56. Переходные характеристики регуляторов, показывающие изменение выходной величины $y(t)$ относительно заданного значения g_0 при скачкообразном входном воздействии ϵ_1 ; верхняя кривая соответствует ОУ с самовыравниванием; Δ_0 — статическая ошибка

ренцирующего звеньев (рис. 2.55)

$$W(p) = U(p)/\epsilon(p) = k_p + k_p/T_{из}p + k_pT_{пр}p.$$

На основе ПИД-регулятора можно реализовать различные законы регулирования путем изменения параметров настройки k_p , $T_{из}$ и $T_{пр}$. Так, при $T_{пр} = 0$ и $T_{и} \rightarrow \infty$ получаем П-регулятор; при $T_{пр} = 0$ получаем ПИ-регулятор; при $T_{и} \rightarrow \infty$ и конечных значениях k_p и $T_{пр}$ получаем регулятор, реализующий пропорционально-дифференциальный закон, когда на выходе регулятора формируется сигнал, пропорциональный сумме сигналов от пропорционального и дифференцирующего звеньев.

Для сравнения на рисунке 2.56 приведены переходные характеристики регуляторов, реализующих рассмотренные законы регулирования. Из графиков видно, что наименьшее динамическое отклонение от заданного значения g_0 и время регулирования имеет регулятор с ПИД-законом регулирования. Верхняя кривая соответствует ОУ с самовыравниванием.

Реализация рассмотренных законов регулирования возможна с применением различных устройств, выполненных на основе гидро-, пневмоэлементов, средств аналоговой и цифровой техники.

2.7.3. ПОЗИЦИОННЫЕ (РЕЛЕЙНЫЕ) АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Широкое распространение в автоматике нашли *позиционные (релейные) регуляторы*, вырабатывающие сигнал, который перемещает регулируемый орган в одно из фиксированных положений

(позиций). Если этих положений два, регулятор называют *двухпозиционным*, если три — *трехпозиционным*. Существуют также *многопозиционные* регуляторы.

Характер процесса регулирования с использованием релейных регуляторов определяется в основном их статическими характеристиками и передаточными функциями ОУ. На рисунке 2.57, а приведена укрупненная структурная динамическая схема САР с релейным регулятором, а на рисунке 2.57, б его статическая характеристика $z = f(\epsilon)$.

Для наглядности (упрощения анализа) значения ϵ и z отсчитывают в приращениях от условного равновесного состояния объекта управления, соответствующего заданным значениям ϵ_0 и z_0 , принятым за начало отсчета. Применительно к двухпозиционному регулятору величину $\Delta_B = 2a$ принято называть *зоной неоднозначности* или *зоной возврата.*

Если ошибка регулирования ϵ превысит пороговое значение a , то регулирующее воздействие на ОУ будет иметь значение z_1 , а при ошибке $\epsilon < -a$, регулирующее значение будет равным $-z_2$. На рисунке 2.58 приведены графики изменения регулируемой величины $y(t)$ в зависимости от управляющего воздействия $z(t)$ для ОУ с передаточной функцией по формуле (2.12), соответствующей аperiодическому звену первого порядка.

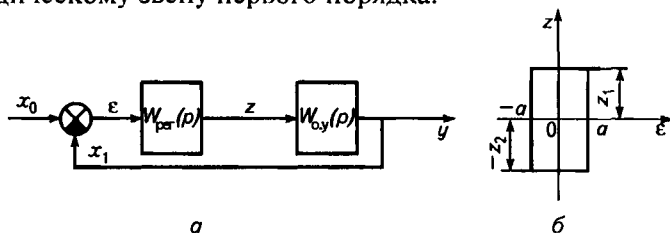


Рис. 2.57. Структурная динамическая схема САР с двухпозиционным релейным регулятором (а) и его статическая характеристика (б) с зоной неоднозначности $2a$

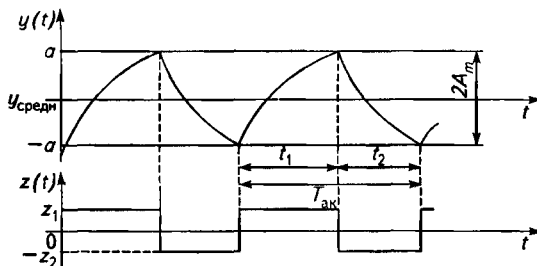


Рис. 2.58. Графики изменения регулируемой величины y под действием управляющего сигнала z с выхода двухпозиционного релейного регулятора для ОУ с передаточной функцией по формуле (2.12)

При поступлении на вход ОУ постоянных регулирующих воздействий z_1 или $-z_2$ регулируемая величина $y(t)$ будет изменяться по экспоненциальному закону [формула (2.24)]. Как видно из графика $y(t)$, в установившемся режиме в замкнутой САР возникают устойчивые автоколебания с периодом $T_{ак}$ и амплитудой A_m , причем амплитуда колебаний равна половине зоны неоднозначности $A_m = a$. Это связано с тем, что во время работы двухпозиционного регулятора постоянно оказывает воздействие на ОУ, даже когда выходка не выходит за пределы зоны неоднозначности ($-a \leq \epsilon \leq a$). На практике статическая характеристика $z = f(\epsilon)$ двухпозиционного регулятора несимметрична относительно начала координат. Поэтому амплитуды автоколебаний для воздействий z_1 и z_2 не будут равны и, следовательно, среднее значение регулируемой величины $y_{срелн}$ не будет равно заданному значению g_0 . В этом случае требуется коррекция настройки регулятора. Формулы для таких расчетов приведены в справочной литературе по автоматике.

Если ОУ представлен аperiodическим или интегрирующим звеньями с запаздыванием [формулы (2.25) и (2.26)], то диапазон автоколебаний регулируемой величины ($2A_m = y_1 - y_2$) будет больше зоны неоднозначности регулятора, поскольку после прекращения внешнего воздействия z_1 регулируемая величина будет продолжать увеличиваться в течение времени запаздывания $t_{зап}$. После истечения времени $t_{зап}$ регулируемая величина начинает уменьшаться за счет воздействия z_2 , и в дальнейшем после начала воздействия z_1 уменьшение будет продолжаться в течение времени $t_{зап}$. На рисунке 2.59 приведены графики для ОУ, имеющего передаточную функцию в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием [по формуле (2.25)]. Таким образом, запаздывание в объектах управления увеличивает амплитуду и период автоколебаний регулируемой величины y .

Двухпозиционные регуляторы имеют два параметра настройки:

заданное значение регулируемой величины g_0 и зону неоднозначности (дифференциал) $\pm a$.

При настройке САР с двухпозиционными регуляторами необходимо так выбрать параметры — зону неоднозначности $2a$ и величины z_1, z_2 регулирующего воздействия, чтобы обеспечить минимальную амплитуду A_m и максимальный период $T_{ак}$ автоколебаний. При этом отклонение среднего значения регулируемой величины $y_{срелн}$ от заданного g_0 должно быть минимально.

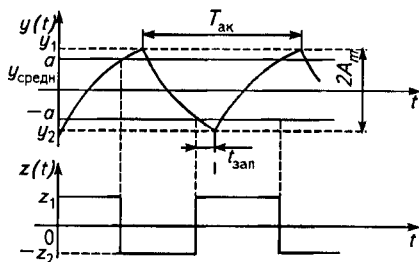


Рис. 2.59. Графики изменения регулируемой величины y под действием управляющего сигнала z с выхода двухпозиционного релейного регулятора для ОУ с передаточной функцией по формуле (2.25)

Уменьшение зоны неоднозначности $2a$ приводит к уменьшению амплитуды A_m и периода колебаний $T_{ак}$, но при этом увеличивается число переключений регулятора, что сокращает срок службы электромеханических релейных элементов и электрических нагревателей, часто используемых в качестве исполнительных устройств. Если же изменять зону неоднозначности в сторону возрастания, чтобы увеличить период $T_{ак}$ и сократить число срабатываний регулятора, это приведет к повышению амплитуды автоколебаний A_m и снижению точности регулирования. Следует сказать, что чем больше постоянная времени ОУ, тем больше период автоколебаний $T_{ак}$ и меньше частота переключений регулятора. Кроме того, чем меньше величины регулирующих воздействий z_1 и z_2 , тем меньше скорость изменения регулируемой величины и, следовательно, тем меньше ее отклонение от заданного значения за время запаздывания $t_{зап}$.

При выборе настроек двухпозиционного регулятора в целях максимального ослабления влияния автоколебаний можно воспользоваться номограммами, приведенными, например, в [1]. Искомые амплитуду A_m и период колебаний $T_{ак}$ определяют на основании свойств ОУ ($k_{о.у}$, $T_{о.у}$, $t_{зап}$) и параметров $2a$ и z .

С помощью трехпозиционных регуляторов обеспечивают более качественное регулирование, чем двухпозиционных. В этих регуляторах регулирующее устройство, кроме двух крайних фиксированных положений «больше» и «меньше», может занимать еще одно промежуточное положение «норма». Статистическая характеристика таких регуляторов с зонами неоднозначности (возврата) $\pm\Delta_B = a_2 - a_1$ приведена на рисунке 2.60. Величина Δ_H носит название *зоны нечувствительности регулятора*.

Из графика на рисунке 2.60 видно, что в пределах зоны нечувствительности трехпозиционный регулятор имеет устойчивое состояние. Если при очередном переключении регулятора в состояние $z = 0$ отклонение ϵ не выходит за пределы зоны нечувствительности регулятора, т. е. выполняется условие $|\epsilon| < \Delta_H/2$, то в этом состоянии САР может оставаться сколь угодно долго. В ней отсутствуют автоколебания, присущие САР с двухпозиционными регуляторами. Настраиваемые параметры трехпозиционных регуляторов — g_0 и $\Delta_H/2$.

САР с позиционными регуляторами широко применяют для автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства

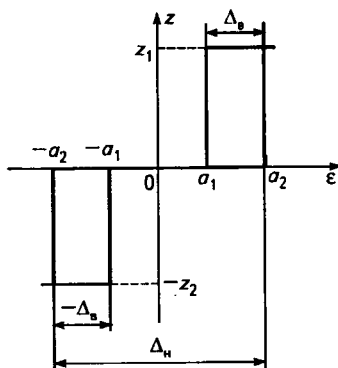


Рис. 2.60. Статистическая характеристика трехпозиционного релейного регулятора с зоной нечувствительности Δ_H и зоной возврата Δ_B

благодаря надежности, дешевизне, простоте настройки таких регуляторов. Кроме того, необходимо отметить простоту управления энергетическими потоками и удобство использования релейного элемента с исполнительным устройством постоянной скорости, перемещающим регулирующее устройство.

Для примера рассмотрим двухпозиционный регулятор ТРМ1, выпускаемый компанией «Овен», предназначенный для измерения и регулирования температуры различных сред в холодильной технике, сушильных шкафах, печах различного назначения и другом технологическом оборудовании. Прибор представляет собой (рис. 2.61) автоматический регулятор с одним входом для подключения датчика *Д*, устанавливаемого на объекте управления (*ОУ*), микропроцессорным блоком обработки данных *БОД*, формирующим сигнал управления выходным устройством *ВУ*.

Для индикации данных служит 4-разрядный цифровой индикатор *ЦИ*. В качестве датчиков могут использоваться термопреобразователи сопротивления типа ТСМ и ТСП, термопары типа ТХК, ТХА и другие разновидности датчиков. Время опроса датчика около 1,5 с. Выходное устройство может содержать электромагнитное реле на рабочий ток 8 А и напряжение 220 В, транзисторную или симисторную оптопару и другие устройства.

Перед началом работы в энергонезависимую память прибора с помощью кнопок, расположенных на передней панели, вводятся рабочие параметры, которые остаются неизменными при выключении питания. Цифровой индикатор в режиме «работа» отображает значение регулируемой величины, а в режиме «программирование» — значения программируемых параметров прибора: заданное значение, гистерезис (зону неоднозначности), режимы работы блока обработки данных, такие, как задержка включения и выключения выходного устройства, код типа датчика, диапазон измерения сигнала и др. Предел допустимой основной погрешности измерения контролируемого параметра (без учета погрешности датчика) $\pm 0,5\%$. Более широкими возможностями обладает восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ138.

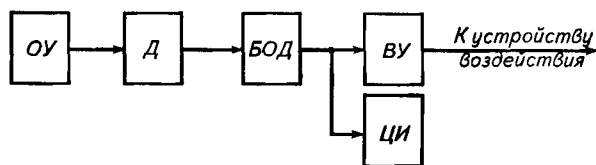


Рис. 2.61. Функциональная схема одноканального измерителя-регулятора типа ТРМ1

2.7.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

Выше были рассмотрены типовые законы регулирования идеальных автоматических регуляторов. Однако при построении реальных автоматических регуляторов существенное влияние на точность реализации требуемого закона регулирования оказывают *свойства устройства воздействия*, и прежде всего инерционность этого устройства. В связи с этим при построении САР необходимо знать и учитывать степень влияния устройства воздействия на точность работы промышленного автоматического регулятора. Поскольку инерционные свойства проявляются в основном у устройств воздействия с перемещающимися регулирующими устройствами (заслонки, задвижки и др.), в дальнейшем под устройством воздействия будем понимать исполнительный механизм с регулирующим органом.

Рассмотрим общий принцип построения структурной динамической схемы автоматического регулятора с исполнительным механизмом, основанный на использовании отрицательной обратной связи (ООС). На рисунке 2.62, а приведена схема, состоящая из последовательно соединенных усилительного устройства с передаточной функцией $W_y(p)$ и исполнительного механизма с передаточной функцией $W_{и.м}(p)$, охваченных цепью ООС, имеющей передаточную функцию $W_{о.с}(p)$. На основании общей формулы (2.22) для передаточной функции замкнутой САР

$$W_3(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)W_{о.с}(p)},$$

для приведенной структурной схемы получим

$$W_3(p) = \frac{W_y(p)W_{и.м}(p)}{1 + W_y(p)W_{и.м}(p)W_{о.с}(p)}.$$

При выборе большого коэффициента усиления усилителя единицей в знаменателе формулы можно пренебречь. Тогда выражение для передаточной функции упростится

$$W_3(p) \approx \frac{1}{W_{о.с}(p)}. \quad (2.44)$$

Из формулы (2.44) следует важный практический результат, заключающийся в том, что динамические свойства всей схемы (см. рис. 2.62, а) не зависят от свойств разомкнутой части схемы [блоки $W_y(p)$ и $W_{и.м}(p)$], а определяются только динамическими

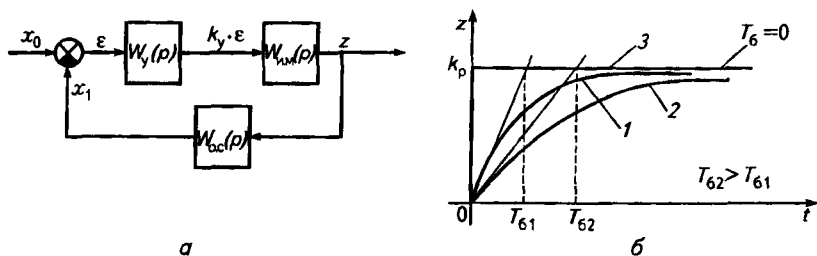


Рис. 2.62. Структурная динамическая схема П-регулятора с исполнительным механизмом (а) и его переходные характеристики (б) при различных значениях постоянной времени T_6 :

1 — при T_{61} ; 2 — при T_{62} ; 3 — при $T_6 = 0$

свойствами цепи обратной связи, имеющей передаточную функцию $1/W_{oc}(p)$. Этот результат широко используют для улучшения динамических свойств САР, например для ослабления отрицательного влияния инерционных свойств исполнительных механизмов, управляемых автоматическими регуляторами.

Проиллюстрируем полученные результаты на примерах широко распространенных в практике пропорциональных и пропорционально-интегральных регуляторов.

Реальный промышленный П-регулятор кроме звена с передаточной функцией $W_p(p) = k_p$ содержит устройство воздействия, например в виде электродвигательного исполнительного механизма с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа. Такой механизм в динамическом отношении представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией $W_{им}(p) = 1/(T_{им}p)$. Исполнительный механизм может иметь и передаточную функцию пропорционального звена, как у пневматических мембранных исполнительных механизмов, в которых перемещение регулирующего органа пропорционально регулирующему воздействию.

Чтобы сформировать требуемый закон регулирования и скомпенсировать влияние на него исполнительного механизма, вводят ООС по положению регулирующего органа. При этом на вход устройства ООС с передаточной функцией $W_{oc}(p)$ поступает сигнал z с датчика перемещения исполнительного механизма (см. рис. 2.62, а). Поскольку свойства всей схемы определяются цепью ООС [формула (2.44)], то для получения закона П-регулирования передаточная функция цепи обратной связи должна иметь следующий вид

$$W_{oc}(p) = 1/W_3(p) = 1/k_p = k_{oc}. \quad (2.45)$$

Таким образом, канал обратной связи в динамическом отношении должен быть выполнен в виде усилительного звена с коэффи-

коэффициентом передачи $k_{o.c} = 1/k_p$, т. е. равным обратному значению коэффициента передачи создаваемого П-регулятора.

Оценим влияние исполнительного механизма на точность формирования П-закона регулирования в реальном регуляторе. Для этого найдем общую передаточную функцию, соответствующую структурной динамической схеме (см. рис. 2.62, а), используя формулы для преобразования структурных схем

$$W(p) = \frac{k_y / (T_{и.м} p)}{1 + k_y k_{o.c} / (T_{и.м} p)} = \frac{1}{k_{o.c} + (T_{и.м} / k_y) p} =$$

$$= \frac{1}{k_{o.c}} \cdot \frac{1}{[T_{и.м} / (k_y k_{o.c})] p + 1} = W_n(p) W_b(p).$$

Таким образом, реальный П-регулятор представляется в динамическом отношении в виде идеального П-регулятора с передаточной функцией

$$W_n(p) = k_p = 1/k_{o.c} \quad (2.46)$$

и некоторого балластного звена с передаточной функцией

$$W_b(p) = 1 / (T_b p + 1), \quad (2.47)$$

которое является аperiodическим звеном первого порядка [формула (2.12)] с коэффициентом передачи, равным единице, и постоянной времени

$$T_b = T_{и.м} / (k_y k_{o.c}). \quad (2.48)$$

Переходные характеристики реального П-регулятора, построенного в соответствии со структурной динамической схемой (см. рис. 2.62, а), приведены на рисунке 2.62, б, где кривая 1 имеет постоянную времени $T_{б1}$, кривая 2 — постоянную времени $T_{б2}$, причем $T_{б2} > T_{б1}$, а переходная характеристика 3 соответствует идеальному П-регулятору с постоянной времени $T_b = 0$. Из рисунка 2.62, б видно, что переходная характеристика реального регулятора отличается от характеристики идеального регулятора вследствие ограниченной скорости работы исполнительного механизма. Это отличие тем больше, чем больше постоянная времени T_b . В свою очередь, чем больше коэффициент k_p , тем больше постоянная времени T_b [формулы (2.46) и (2.48)]. Поэтому для уменьшения влияния балластного звена в структурной динамической схеме (см. рис. 2.62, а) следует увеличивать коэффициент усиления k_y [см. формулу (2.48)]. Параметр настройки рассмотренного

регулятора — коэффициент передачи $k_{o.c}$ устройства обратной связи: чем он больше, тем меньше коэффициент передачи регулятора k_p , и наоборот [формула (2.46)].

Обратную связь по положению регулирующего органа исполнительного механизма вводят при помощи реостата обратной связи. Величину, обратную коэффициенту k_p и выраженную в процентах, называют *пределом (зоной) пропорциональности* регулятора $\delta_p = 100/k_p = 100k_{o.c}$. Физически этот параметр равен значению входного сигнала ϵ , выраженному в процентах диапазона измерения, вызывающего перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое, т. е. на 100 % хода регулирующего органа.

Рассмотрим теперь один из вариантов построения промышленного ПИ-регулятора. Идеальный ПИ-регулятор имеет передаточную функцию, определяемую выражениями (2.40) или (2.42). Если в качестве исполнительного устройства используется тот же электродвигательный исполнительный механизм с передаточной функцией $W_{и.м}(p) = 1/(T_{и.м}p)$, что и в предыдущем примере, то структурная динамическая схема регулятора будет иметь вид, представленный на рисунке 2.63, а. Собственно ПИ-закон регулирования формируется с помощью идеального ПИ-регулятора с передаточной функцией $W_{п.и}(p)$ [формула (2.40)].

Для уменьшения отрицательного влияния на ПИ-регулятор исполнительного механизма в схему введена ООС в виде усилительного звена с передаточной функцией $W_{o.c}(p) = k_{o.c}$.

Запишем выражение передаточной функции реального ПИ-регулятора в соответствии со структурной динамической схемой (см. рис. 2.63, а)

$$W_p(p) = W_{п.и}(p) \frac{1/(T_{и.м}p)}{1 + k_{o.c}/(T_{и.м}p)} = W_{п.и}(p) \frac{1}{T_{и.м}p + k_{o.c}}$$

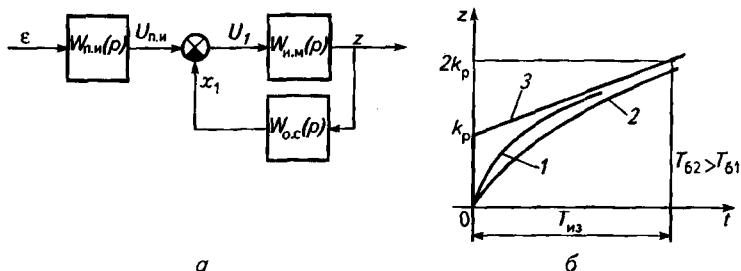


Рис. 2.63. Структурная схема ПИ-регулятора с исполнительным механизмом (а) и его переходные характеристики (б) для различных значений постоянной времени T_0 :

1 — при T_{61} ; 2 — при T_{62} ; 3 — при $T_0 = 0$

Разделив числитель и знаменатель на $k_{0.c}$, получим

$$W_p(p) = \frac{W_{п.и}(p)}{k_{0.c}} \cdot \frac{1}{T_6 p + 1}. \quad (2.49)$$

Таким образом, реальный ПИ-регулятор, имеющий структурную динамическую схему (см. рис. 2.63, а), реализует ПИ-закон регулирования с погрешностью, определяемой балластным апериодическим звеном первого порядка [формула (2.47)]. Постоянная времени балластного звена

$$T_6 = T_{и.м}/k_{0.c}. \quad (2.50)$$

Из выражения (2.50) следует, что чем больше $k_{0.c}$, тем меньше T_6 и тем меньше погрешность реализации закона ПИ-регулирования. Однако при увеличении $k_{0.c}$ уменьшается коэффициент передачи ПИ-регулятора, который согласно формулам (2.49) и (2.40) или (2.42) равен отношению $k_p/k_{0.c}$. Для сохранения требуемого значения коэффициента передачи регулятора одновременно с увеличением $k_{0.c}$ следует пропорционально увеличивать k_p .

На рисунке 2.63, б представлены переходные характеристики ПИ-регулятора с различными значениями постоянной времени балластного звена, причем $T_{62} > T_{61}$. Чем больше постоянная времени, тем больше искажается идеальный ПИ-закон регулирования, имеющий место при $T_6 = 0$ (кривая 3).

Следует отметить, что балластное звено в виде апериодического звена первого порядка [формула (2.47)] в рассмотренных схемах регуляторов часто оказывает положительное влияние на процесс регулирования. Так, при кратковременных отклонениях регулируемой величины от заданного значения благодаря демпфированию балластного звена исполнительный механизм САР с таким регулятором не приходит в действие, что повышает его срок службы.

Во многих промышленных автоматических регуляторах с исполнительным механизмом, перемещающимся с постоянной скоростью, используют *релейно-импульсный режим* формирования ПИ-закона регулирования. Это позволяет упростить процесс регулирования при сохранении высокого качества стабилизации регулируемого параметра. Схема такого регулятора представлена на рисунке 2.64, а. В отличие от предыдущей схемы (см. рис. 2.63, а) в состав усилителя 1 кроме каскада 2 с передаточной функцией $W_y(p) = k_p$ входит дополнительный усилительный блок 3 в виде трехпозиционного релейного элемента со статической характеристикой, аналогичной характеристике, показанной на рисунке 2.60, а цепь ООС состоит из апериодического звена первого порядка 4 в виде RC-цепи (рис. 2.64, б). Переменный резистор R2 служит для

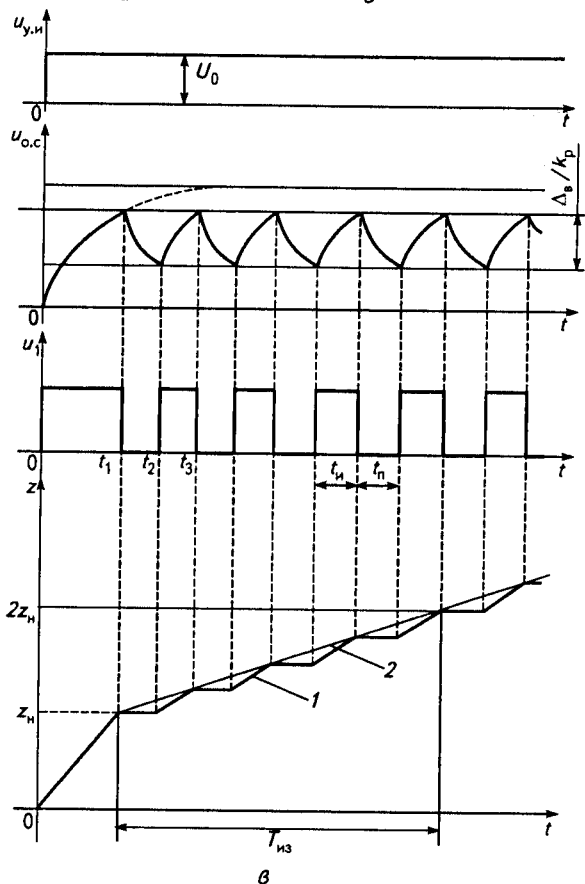
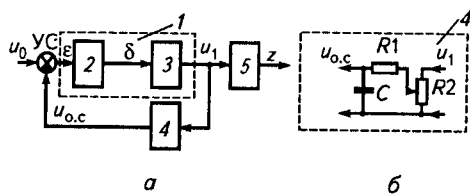


Рис. 2.64. Функциональная схема регулятора с релейно-импульсным режимом формирования ПИ-закона регулирования (а), электрическая схема звена обратной связи (б) и временные диаграммы, поясняющие работу регулятора (в):

1 — ломаная линия реального перемещения регулирующего органа, 2 — линия 1, аппроксимированная отрезком прямой

настройки регулятора. В качестве релейного элемента можно использовать, например, поляризованное реле. Временные диаграммы, поясняющие работу регулятора, приведены на рис. 2.64, в.

На вход устройства сравнения УС поступают два сигнала: сигнал u_0 с устройства измерения УИ и изменяющийся во времени сигнал обратной связи $u_{o.c}$ с блока 4. На выходе устройства сравнения формируется переменный сигнал $\epsilon = u_0 - u_{o.c}$. Воздействующий на вход усилителя 1 сигнал ϵ усиливается каскадом 2 до величины $\delta = k_p \epsilon$ и поступает на вход релейного элемента 3. Если значение $\delta_1 = k_p \epsilon_1$ больше половины зоны нечувствительности $\Delta_n/2$ элемента 3 (см. рис. 2.60), он срабатывает и в зависимости от знака рассогласования вырабатывает сигнал u_p величиной u_1 , включающий исполнительный механизм, который перемещает регулируемый орган в сторону ликвидации отклонения регулируемой величины от заданного значения.

Одновременно с подачей постоянного напряжения u_1 на исполнительный механизм 5 это напряжение (или часть его) подается и в цепь ООС, вызывая заряд конденсатора С. При достижении напряжением $u_{o.c}$ на выходе RC-цепи значения, при котором $\delta_2 = k_p \epsilon_1$ становится меньше значения $\Delta_n/2 - \Delta_b$ (см. рис. 2.60), релейный элемент отключается (момент t_1 на рис. 2.64, в), исполнительный механизм останавливается, а напряжение u_p на входе цепи ООС становится равным нулю. После этого конденсатор С начинает разряжаться через резистор R1 и часть резистора R2 (между движком и нижним концом резистора). С этого момента значения ϵ_1 и соответственно $k_p \epsilon_1$ будут увеличиваться и при $\delta_1 > \Delta_n/2$ в момент времени t_2 релейный элемент снова срабатывает, исполнительный механизм включается, перемещая регулируемый орган на величину, пропорциональную длительности импульса t_n до момента времени t_3 . Далее процесс периодического включения и отключения релейного элемента, а следовательно, и исполнительного механизма повторяется.

Характер перемещения $z(t)$ регулирующего органа имеет вид ломаной линии 1 (см. рис. 2.64, в). Эту линию приблизительно можно заменить прямой, причем чем меньше длительность одного включения t_n и длительность паузы t_p , тем точнее совпадает действительный закон 1 изменения $z(t)$ с линеаризованной прямой 2. Сравнивая изменение выходной величины $z(t)$ в виде прямой 2 с идеальным законом ПИ-регулирования (см. рис. 2.51), можно сделать вывод, что релейно-импульсный регулятор с исполнительным механизмом постоянной скорости приблизительно реализует ПИ-закон регулирования. Под действием входного сигнала ϵ пропорциональная составляющая закона ПИ-регулирования реализуется за счет быстрого начального перемещения регулирующего органа с постоянной скоростью, а интегральная составляющая — за счет последующего автоколебательного режима работы релейного элемента. Длительность первого импульса, действующего на

интервале $0-t_1$, пропорциональна величине ε и коэффициенту усиления регулятора k_p , т. е. представляет собой пропорциональную составляющую $z_{п.и} = k k_p \varepsilon$ общего регулирующего воздействия $z_{п.и}$ ПИ-закона регулирования, где k — коэффициент пропорциональности. Наклон интегральной части кривой 2 (интегрирующая составляющая $z_{и}$ общего воздействия $z_{п.и}$), а следовательно, и время изохрома $T_{из}$ (см. рис. 2.51) зависит от длительности импульсов и пауз, образующихся при работе регулятора. Параметры настройки регулятора $T_{и.з}$ и k_p , определяемые параметрами RC-цепи (R_1 и R_2), находят по кривой 2 (см. рис. 2.64, в) так же, как и для ПИ-регулятора непрерывного действия (см. рис. 2.51).

Рассмотренный релейно-импульсный режим работы регуляторов используют во многих промышленных автоматических регуляторах (Р-25, Р-29 и др.), нашедших широкое применение в сельскохозяйственном производстве.

Более совершенный, чем регулятор ТРМ1, — автоматический регулятор типа ТРМ101, который осуществляет аналоговое или импульсное управление нагрузкой по ПИД-закону, хотя в нем предусмотрены и двухпозиционный режим регулирования, а также режим сигнализации выхода регулируемой величины за установленные границы. Контролируемый параметр определяется типом используемого датчика, имеющего унифицированный выходной сигнал в виде тока $0...20$ ($4...20$) мА или напряжения $0...10$ В. При этом можно контролировать давление, влажность, расход и другие физические величины. В случае регулирования температуры на вход прибора можно подключать термодатчики следующих типов: ТСМ, ТСР, ТХК, ТХА и др.

Сигнал, поступающий с датчика, подвергается в микропроцессорном блоке обработки цифровой фильтрации от внешних помех. Для снижения погрешностей датчиков в приборе предусмотрена коррекция их статической характеристики: сдвиг и изменение наклона. Особенность регулятора — *режим автонастройки*, позволяющий автоматически определять оптимальные для конкретного ОУ параметры настройки [формула (2.43)]. В этом режиме регулятор выдает на устройство воздействия максимальный выходной сигнал и измеряет получаемый при этом выходной сигнал. Как только скорость изменения регулируемого параметра становится постоянной, блок обработки вычисляет необходимые коэффициенты ПИД-регулирования и на этом процесс автонастройки заканчивается. Полученные значения коэффициентов можно просмотреть на цифровом индикаторе и при необходимости скорректировать. Как и прибор ТРМ1, автоматический регулятор ТРМ101 перед началом работы программируют: в энергонезависимую память заносят параметры его работы.

Выходной сигнал регулятора может быть преобразован в аналоговый сигнал (ток $4...20$ мА) или в сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Особенно эффективен автоматический регу-

лятор ТРМ101 в управлении объектами с повышенной инерционностью, где, как указывалось выше, двухпозиционные регуляторы не обеспечивают требуемую точность.

Наряду с аналоговыми (непрерывными) сигналами в автоматических регуляторах используют и дискретные (цифровые) сигналы в виде *решетчатых функций* с квантованными значениями, представленными в дискретные моменты времени. Современный уровень автоматизации технологических процессов характеризуется широким применением *микроконтроллеров* (устройств управления). Микроконтроллер содержит микропроцессор, большой объем памяти для записи и хранения команд программы и данных, узлы для обмена данными с внешними устройствами.

Рассмотрим САР дискретного действия на базе микроконтроллера (рис. 2.65).

Аналоговый сигнал $x_1(t)$ с устройства измерения УИ, несущий информацию о состоянии ОУ, поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП, где он преобразуется в цифровой код. В основе такого преобразования лежит замена непрерывной величины $x_1(t)$ значениями сигнала $x(nT_n)$ только в определенные моменты времени nT_n , где n — целое число, отстоящими друг от друга на равные интервалы времени T_n . Эти интервалы называют *интервалами дискретизации* (рис. 2.66).

Сигнал в дискретные моменты времени t_0, t_1, t_2 и т. д. также принимает не текущие значения, а только ограниченные (квантованные) значения, полученные путем округления каждой величины $x(nT_n)$ до ближайшего уровня, пропорционального *шагу квантования* Δy . Для этого создают сетку так называемых уровней квантования, сдвинутых друг относительно друга на величину Δy . Каждому уровню квантования можно присписать порядковый номер (0, 1, 2, 3, 4 и т. д.). В результате квантования полученные при дискретизации значения $x(nT_n)$ исходного аналогового сигнала

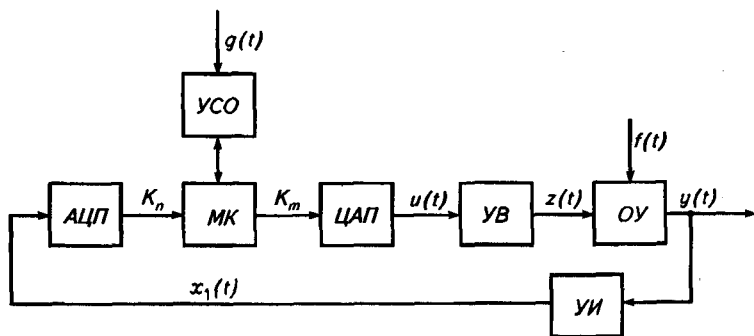


Рис. 2.65. Структурная схема САР на базе микроконтроллера

мой величины и перерегулирование, минимальную статическую ошибку. Выполнить указанные требования одновременно с помощью одного регулятора достаточно сложно. Поэтому при выборе регулятора принимают ряд допущений и ограничений.

1. Используют упрощенные модели ОУ в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием (2.25) (вместо реального, но более сложного в расчетах аperiodического звена второго порядка) и интегрирующего звена с запаздыванием (2.26) (см. рис. 2.18...2.20). Первую модель используют для ОУ с самовыравниванием (статические объекты), вторую — для объектов без самовыравнивания (астатические ОУ).

2. Принимают один из трех видов типовых переходных процессов: аperiodический, колебательный с 20%-ным перерегулированием или колебательный с минимумом квадратичной интегральной оценки (см. подраздел 2.3.2).

Аperiodический процесс выбирают в тех случаях, когда не допускается перерегулирование (например, в некоторых техпроцессах, связанных с производством пищевых продуктов), требуется минимальное время регулирования $t_{\text{пер}}$, а динамическое отклонение u_1 может быть достаточно большим.

Процесс с 20%-ным перерегулированием может использоваться, если по условиям эксплуатации перерегулирование допустимо, но динамическое отклонение регулируемой величины должно быть ограничено.

Процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки $J_2 \rightarrow \min$ [формула (2.33)] характеризуется наибольшим перерегулированием (40...45 %) и временем регулирования, но имеет наименьшее динамическое отклонение.

3. Выбирают *тип регулятора*, определяющий характер его воздействия на ОУ. Он зависит от значения отношения времени запаздывания $t_{\text{зап}}$ к постоянной времени ОУ: $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$. Следует сказать, что чем больше значение $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$, тем сложнее управлять объектом.

Если $t_{\text{зап}}/T_{0,y} < 0,2$, то на объектах управления, имеющих большую емкость и незначительное запаздывание, а также если не требуется высокой точности стабилизации регулируемой величины, рекомендуется применять *позиционные (релейные) регуляторы*.

Если выполняется условие $0,2 \leq t_{\text{зап}}/T_{0,y} \leq 1,0$, то на объектах средней емкости с небольшим запаздыванием и плавно изменяющейся нагрузке используют *регуляторы непрерывного действия*.

Если $t_{\text{зап}}/T_{0,y} > 1$, то на ОУ с малой емкостью и большим запаздыванием при нагрузках любого характера целесообразно использовать *импульсные и цифровые регуляторы*.

Выбор закона регулирования. На выбор закона регулирования разрабатываемой для конкретного объекта САР оказывают влияние ряд факторов: вид передаточной функции ОУ, отношение общего запаздывания $t_{\text{зап}}$ к постоянной времени $T_{0,y}$, параметры воз-

мушающих воздействий, требования к качеству работы создаваемой САР.

Рассмотрим методику выбора закона регулирования для непрерывного регулятора, учитывающую влияние этих факторов. Основные исходные данные для выбора.

1. Максимально возможное значение возмущающего воздействия f_m , которое можно скомпенсировать регулирующим воздействием, например перемещением регулирующего органа на величину r_b , выражаемую в процентах. Сущность коэффициента r_b поясним на следующем примере. Пусть необходимо стабилизировать температурный режим внутри помещения с использованием в качестве исполнительного устройства калорифера. Если для поддержания требуемого режима при минимально возможной температуре окружающей среды регулирующий орган (клапан), через который поступает теплоноситель в калорифер, должен быть открыт, например, на 80 % максимального значения, то это значение и будет коэффициентом r_b .

2. Допустимое динамическое отклонение $y_{\text{доп}}$ регулируемой величины (y_1 см. на рис. 2.27).

3. Допустимое перерегулирование $\sigma_{\text{доп}}$.

4. Допустимая установившаяся статическая ошибка Δ_0 доп. Если статическая ошибка не задана, ее значение выбирают из выражения $\Delta_0 \text{ доп} = 0,05_{\text{уст}}$.

5. Допустимое время регулирования $t_{\text{рег. доп}}$ (см. рис. 2.27).

Закон регулирования для *статических* объектов выбирают по известному отношению $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$ и требуемому динамическому ко-

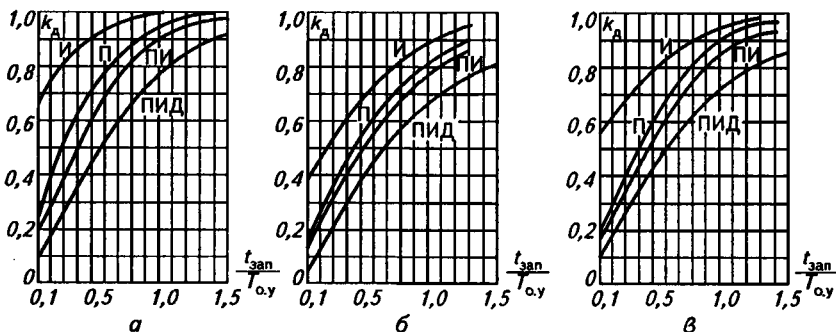


Рис. 2.67. Графики изменения динамических коэффициентов регулирования k_d для статических объектов от величины $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$:

а — для аperiodических переходных процессов; б — для процессов с 20%-ным перерегулированием; в — для процессов с минимумом интегральной оценки J_2

эффиценту регулирования k_d

$$k_d = \frac{y_{1 \text{ доп}}}{k_{0,y} r_{\text{в}}},$$

где $k_{0,y} = (y_{\text{уст}} - y_{\text{нач}})/(z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}})$ — коэффициент передачи объекта управления (см. подраздел 2.2.5).

Коэффициент k_d показывает, во сколько раз снижается динамическое отклонение в САР с использованием регулятора по сравнению с возможным максимальным отклонением регулируемой величины $y(t)$ в разомкнутой системе (без регулятора). Выбранный закон принимают, если значение k_d , полученное по графикам (рис. 2.67), не превосходит расчетное.

Далее для выбранного закона регулирования проверяют время регулирования по таблице 2.2, которое не должно превышать заданное.

2.2. Время регулирования $t_{\text{рег}}$ для различных регуляторов и типовых процессов регулирования

Тип регулятора	Апериодический процесс	Процесс с 20%-ным перерегулированием	Процесс с минимумом J_2 [формула (2.33)]
П	$4,5t_{\text{зап}}$	$6,5t_{\text{зап}}$	$9t_{\text{зап}}$
ПИ	$8t_{\text{зап}}$	$12t_{\text{зап}}$	$16t_{\text{зап}}$
ПИД	$5,5t_{\text{зап}}$	$7t_{\text{зап}}$	$10t_{\text{зап}}$

Если время регулирования $t_{\text{рег}}$, полученное из таблицы 2.2, превышает заданное, то выбирают более сложный закон регулирования (например, вместо ПИ-закона выбирают ПИД-закон регулирования).

Если для рассматриваемого ОУ П-закон оказывается наилучшим, то сначала по графикам (рис. 2.68), используя значение $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$ и один из трех типовых переходных процессов (1 — аperiодический процесс, 2 — процесс с 20%-ным перерегулированием, 3 — процесс с минимумом J_2), находят относительную статическую ошибку $\bar{\Delta}_0$, а затем определяют расчетное значение установившейся статической ошибки

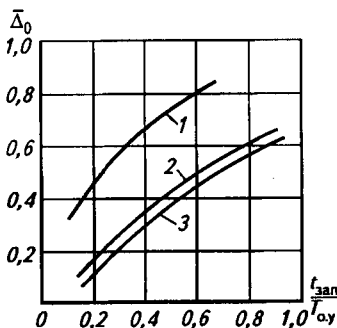


Рис. 2.68. Графики изменения относительной статической ошибки $\bar{\Delta}_0$ от величины $t_{\text{зап}}/T_{0,y}$:

1 — для аperiодических переходных процессов; 2 — для процессов с 20%-ным перерегулированием; 3 — для процессов с минимумом интегральной оценки J_2

по формуле

$$\Delta_{0\text{расч}} = \bar{\Delta}_0 k_{0,y} r_B.$$

Если расчетное значение этой ошибки превышает допустимое $\Delta_{0\text{ доп}}$, то П-закон регулирования заменяют ПИ- или ПИД-законом.

При выборе закона регулирования для *астатического* объекта с запаздыванием динамический коэффициент k_D определяют по формуле

$$k_D = \frac{y_{1\text{ доп}}}{k'_{0,y} r_B t_{\text{зап}}},$$

где коэффициент $k'_{0,y}$ определяют по формуле (2.27).

На основании известных параметров объекта управления $t_{\text{зап}}$ и $k_{0,y}$, а также требуемых показателей качества $t_{\text{рег доп}}$, $\sigma_{\text{доп}}$, $y_{1\text{ доп}}$ при значении r_B , можно выбрать закон регулирования по таблице 2.3. Напомним, что И-закон регулирования на астатических объектах не используют, так как САР с ними неустойчивы.

2.3. Выбор закона регулирования для астатического объекта управления

Закон регулирования	Значения k_D и $t_{\text{рег}}$ при типовом процессе регулирования					
	Апериодический процесс		Процесс с 20%-ным перерегулированием		Процесс с минимумом J_2	
	k_D	$t_{\text{рег}}$	k_D	$t_{\text{рег}}$	k_D	$t_{\text{рег}}$
П	2,9	$6t_{\text{зап}}$	1,4	$8t_{\text{зап}}$	—	—
ПИ	1,4	$14t_{\text{зап}}$	1,3	$16t_{\text{зап}}$	0,9	$18t_{\text{зап}}$
ПИД	1,3	$9t_{\text{зап}}$	1,1	$12t_{\text{зап}}$	0,8	$13t_{\text{зап}}$

Рассмотрим п р и м е р выбора закона регулирования для САР температуры на ОУ с $k_{0,y} = 0,25^\circ\text{C}/\%$ хода регулирующего органа (при изменении хода регулирующего органа, через который подается теплоноситель к ОУ, на 1 % от полного хода, значение температуры изменяется на $0,25^\circ\text{C}$), $t_{\text{зап}} = 70$ с, $T_{0,y} = 230$ с. Требуется обеспечить следующие показатели переходного процесса: $y_{1\text{ доп}} = 5^\circ\text{C}$, $\sigma_{\text{доп}} = 0,3$, $\Delta_{0\text{ доп}} = 0,5^\circ\text{C}$, $t_{\text{рег доп}} = 400$ с, причем $r_B = 35\%$.

1. Находим динамический коэффициент регулирования для статического объекта

$$k_D = \frac{y_{1\text{ доп}}}{k_{0,y} r_B} = \frac{5}{0,25 \cdot 35} = 0,57.$$

Поскольку заданное значение перерегулирования составляет 30 %, типовой переходный процесс с 20%-ным перерегулированием не рассматриваем.

2. Выбираем, например, апериодический типовой переходный процесс. По графикам (рис. 2.67, а) и по отношению $t_{\text{зап}}/T_{0,y} = 70/230 = 0,3$, устанавливаем, что выбранный апериодический процесс может обеспечить П-регулятор.

3. Проверяем по таблице 2.2, обеспечивает ли выбранный П-регулятор заданное время регулирования $T_{\text{рег}} = 4,5t_{\text{зап}} = 4,5 \cdot 70 = 315$ с. Таким образом, $t_{\text{рег п}} < t_{\text{рег. доп}}$.

4. Для П-регулятора необходимо определить установившуюся статическую ошибку, находя предварительно по графикам (см. рис. 2.68) значение $\Delta_0 = 0,56$. Тогда

$$\Delta_0_{\text{расч}} = \bar{\Delta}_0 k_{0,y} r_B = 0,56 \cdot 0,25 \cdot 35 = 4,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Поскольку $\Delta_0_{\text{расч}} > \Delta_0_{\text{доп}}$, то выбираем более сложный ПИ-закон регулирования, для которого статическая ошибка равна нулю.

6. Проверяем, используя таблицу 2.2, обеспечивает ли данный закон допустимое время регулирования

$$t_{\text{рег ПИ}} = 8t_{\text{зап}} = 8 \cdot 70 = 560 \text{ с}.$$

7. Так как и ПИ-регулятор не обеспечивает заданное время регулирования ($t_{\text{рег ПИ}} > t_{\text{рег доп}}$), выбираем ПИД-закон. Определяем по таблице 2.2 $t_{\text{рег ПИД}} = 5,5t_{\text{зап}} = 5,5 \cdot 70 = 385$ с. Поскольку $t_{\text{рег ПИД}} < t_{\text{рег. доп}}$, выбираем для САР ПИД-регулятор.

Расчет оптимальных параметров настройки автоматических регуляторов непрерывного действия. Автоматический регулятор в соответствии с найденным законом регулирования должен обеспечить реализацию одного из выбранных типовых переходных процессов. Однако если не задать нужные параметры настройки регулятора, то отклонения регулируемой величины могут превысить заданные. Поэтому необходимо рассчитать соответствующие параметры настройки регулятора.

Рассмотрим один из инженерных методов оценки параметров настройки автоматического регулятора по эмпирическим формулам, приведенным в таблицах 2.4 и 2.5. Исходная информация для расчета — параметры ОУ $k_{0,y}$, $T_{0,y}$, $t_{\text{зап}}$ и выбранный закон регулирования, обеспечивающий заданный типовой переходный процесс.

2.4. Определение оптимальных настроек автоматических регуляторов для статических объектов управления при типовом переходном процессе

Тип регулятора	Апериодический процесс	Процесс с 20%-ным переерегулированием	Процесс с минимумом J_2 [формула (2.33)]
И	$k_p = \frac{1}{4,5k_{0,y}T_{0,y}}$	$k_p = \frac{1}{1,7k_{0,y}T_{0,y}}$	$k_p = \frac{1}{1,7k_{0,y}T_{0,y}}$
П	$k_p = \frac{0,3}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$	$k_p = \frac{0,7}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$	$k_p = \frac{0,9}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$
ПИ	$k_p = \frac{0,6}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 0,6T_{0,y}$	$k_p = \frac{0,7}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 0,7T_{0,y}$	$k_p = \frac{1,0}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = T_{0,y}$
ПИД	$k_p = \frac{0,95}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 2,4t_{зап}$ $T_{пр} = 0,4t_{зап}$	$k_p = \frac{1,2}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 2,0t_{зап}$ $T_{пр} = 0,4t_{зап}$	$k_p = \frac{1,4}{k_{0,y}t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 1,3t_{зап}$ $T_{пр} = 0,5t_{зап}$

2.5. Определение оптимальных настроек автоматических регуляторов для астатических объектов управления при типовом переходном процессе

Тип регулятора	Апериодический процесс	Процесс с 20%-ным переерегулированием	Процесс с минимумом J_2 [формула (2.33)]
П	$k_p = \frac{0,4}{t_{зап}/T_{0,y}}$	$k_p = \frac{0,7}{t_{зап}/T_{0,y}}$	—
ПИ	$k_p = \frac{0,4}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 6t_{зап}$	$k_p = \frac{0,7}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 3t_{зап}$	$k_p = \frac{1,0}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 4t_{зап}$
ПИД	$k_p = \frac{0,6}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 5t_{зап}$ $T_{пр} = 0,2t_{зап}$	$k_p = \frac{1,1}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 2t_{зап}$ $T_{пр} = 0,4t_{зап}$	$k_p = \frac{1,4}{t_{зап}/T_{0,y}}$ $T_{из} = 1,6t_{зап}$ $T_{пр} = 0,5t_{зап}$

Примечание: k_p — коэффициент передачи регулятора; $T_{из}$ — время изодрома; $T_{пр}$ — время предвращения; для астатических объектов в таблице 2.5 вместо постоянной времени $T_{0,y}$ используется постоянная времени (время разгона) T_d (подраздел 2.2.5).

Выбор оптимальных параметров настройки автоматических регуляторов на основе математических моделей, учитывающих реальные условия работы САР, с использованием программы MathCad приведен в специализированных пособиях.

После выбора параметров настройки регулятора необходимо проверить выполнение заданных режимов работы САР. Для этого используют различные методы, например строят переходную характеристику и по ней графически определяют основные показатели качества регулирования (см. раздел 2.3.2). Если эти показатели не удовлетворяют заданным требованиям, то пересчитывают параметры настройки автоматического регулятора или изменяют параметры и варианты включения корректирующих устройств.

Контрольные вопросы и задания

1. Приведите классификацию автоматических регуляторов. 2. Охарактеризуйте основные законы регулирования, используемые в автоматических регуляторах. 3. Как влияют свойства объектов управления на выбор закона регулирования? 4. Объясните работу двух- и трехпозиционных регуляторов. 5. В чем заключаются преимущества позиционных (релейных) регуляторов и какова область их применения? 6. Как работает регулятор с релейно-импульсным режимом формирования ПИ-закона регулирования? 7. Как влияет исполнительный механизм на работу П- и ПИ-регуляторов? 8. В чем заключаются преимущества цифровых автоматических регуляторов? 9. Поясните работу САР дискретного действия. 10. Какова методика выбора закона регулирования при построении САР? 11. Опишите методику выбора параметров настройки автоматического регулятора.

2.8. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Электрифицированные сельскохозяйственные механизмы подразделяют в основном на следующие группы.

1. Центробежные механизмы: насосы; центробежные и осевые вентиляторы, молочные и другие центрифуги; вакуумные насосы.

2. Установки с кривошипно-шатунным механизмом: поршневые насосы, поршневые компрессоры, поршневые прессы сена и соломы, лесопильные рамы.

3. Механические транспортеры: подачи продукта (ленточные, ковшовые, шнековые, тросошайбовые, спиральные), раздачи кормов (скребковые, мобильные и др.); уборки навоза (цепные, штанговые, скреперные).

4. Машины первичной переработки продуктов и приготовления кормов: зернодробилки, измельчители грубых кормов; смесители, грануляторы, молотилки-терки, теребивильные машины, сортировальные и др.

Большинство машин работает в режимах S1 и S2, значительно меньшее число — в режиме S3 (см. разд. 1). Другие режимы работы встречаются крайне редко.

Предварительно электродвигатель выбирают по средней мощности за рабочий цикл. После этого мощность уточняют по действительной нагрузочной диаграмме. В случае необходимости электродвигатель проверяют по условиям нагрева и перегрузки.

Автоматизация управления технологическими процессами сельскохозяйственного производства представлена большим количеством различных схемных решений, однако ввиду ограниченного объема учебника лишь некоторые из них приведены в этом разделе.

2.8.1. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Выбор мощности электропривода установок для послеуборочной обработки зерна. Молотилка. Мощность нагрузки, кВт, на валу электропривода (ЭП)

$$P_M = \frac{ldz}{0,762\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.51)$$

где l, d — соответственно длина и диаметр барабана молотилки, м; z — число бил; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи (для ременной 0,85...0,9; клиноременной 0,97...0,98; зубчатой 0,98; при непосредственном соединении с помощью муфты 1,0).

Решетный стан. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП основного рабочего органа — плоских качающихся решет решетного стана зерноочистительной машины

$$P_{\text{р.с}} = \frac{k_3 m j_0^2}{657,5 m \eta_{\text{пер}}}, \quad (2.52)$$

где $k_3 = 1,2...1,5$ — коэффициент запаса; m — масса решетного стана, кг (приблизительно 100...300 кг); j_0 — оптимальное ускорение решета, м/с² (принимают $j_0 = 15...30$ м/с²); n — частота колебаний решета, мин⁻¹ (качающимся решетам сообщают обычно $n = 500$ мин⁻¹); $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передаточного механизма, $\eta_{\text{пер}} = 0,6...0,7$.

Мощность электродвигателя вентилятора решетного стана рассчитывают методами, изложенными в разделе 1.

Если остальные рабочие органы (щетки, шнек) решетного стана имеют привод от того же электродвигателя, что и решетный стан, то рассчитанная мощность для привода решет электродвигателя увеличивается в 1,25...1,75 раза.

Цилиндрический триер зерноочистительной машины. Он предназначен для разделения на фракции подаваемого в его вращающийся цилиндр зернового материала. Мощность нагрузки, кВт,

на валу ЭП

$$P_{\text{ц.т}} = \frac{p_1 Q 10^{-3}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.53)$$

где p_1 — удельная мощность, Вт/(кг·ч) (принимают равной 0,2...0,6 Вт/(кг·ч); Q — подача триера (или блока триеров), кг/ч; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи (принимают равным 0,8...0,9).

Спиральный транспортер для зерна. Для односпирального транспортера мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{\text{с.т}} = \frac{Q(p_1 l \pm H)k_3}{367\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.54)$$

где Q — подача транспортера, т/ч; p_1 — коэффициент сопротивления перемещению материала, зависящий от конструктивных параметров транспортера, частоты вращения спирали и скорости перемещаемого материала ($p_1 = 10...30$); l — длина трассы, м; H — высота подъема (опускания) материала, м; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи от электродвигателя к спирали; $k_3 = 1,3...1,5$ — коэффициент запаса.

Пневмотранспортеры для транспортировки зерна и зернопродуктов. Во всасывающих транспортерах, перемещающих материал из нескольких точек в одну, в нагнетательных транспортерах, обеспечивающих подачу из одной точки в несколько, и пневмотранспортерах смешанного типа материал перемещается по трубопроводам, минуя вентилятор, или через рабочее колесо вентилятора (пневмотранспортеры типа эксгаустеров).

Если транспортируемый материал не проходит через вентилятор, то мощность нагрузки, кВт,

$$P_{\text{п.з}} = \frac{q_{\text{в}} p_0}{\eta_{\text{в}} \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.55)$$

где $q_{\text{в}}$ — расход воздуха, м³/с; p_0 — перепад давлений с учетом динамического давления для чистого воздуха, потерь давления на прямолинейном участке, в местных сопротивлениях и в разгрузочном устройстве — циклоне, а также возможного подсоса воздуха, потери на подъем материала, Па; $\eta_{\text{в}}$ — КПД вентилятора; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

Если материал пропускают через рабочее колесо вентилятора, то мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП возрастает в зависимости от коэффициента концентрации смеси (воздуха и материала):

$$P_{\text{п.з}} = \frac{(1 + \mu) q_{\text{в}} H_0}{\eta_{\text{в}} \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.56)$$

где μ — коэффициент концентрации смеси материала и воздуха, который выбира-

ют в зависимости от транспортируемого материала и типа пневмотранспортера, $\mu = \frac{q_m}{q_b} \rho$, q_m — подача (массовая) транспортера, кг/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Метательный транспортер для зерна. Он не перемещает продукт, а забрасывает его со скоростью до 18 м/с на расстояние до 18...20 м. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{\text{м.т}} = \frac{Qkv^2}{2\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.57)$$

где Q — подача транспортера, кг/с; $k = 1,5...2,0$ — коэффициент, учитывающий сопротивление в механизмах; v — начальная скорость метания продукта, м/с, принимают 15...18 м/с; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

Передвижной скребковый транспортер для зерна с открытыми скребками. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{\text{п.с.т}} = 9,81 \frac{k_1 Q(Lk_2 + H)}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.58)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при пуске, $k_1 = 1,2...1,5$; Q — подача транспортера, кг/с; L — длина горизонтальной проекции транспортера (длина перемещения продукта), м; k_2 — коэффициент сопротивления движению (табл. 2.6); H — высота транспортирования материала, м; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

2.6. Коэффициент сопротивления k_2 в зависимости от подачи

Тип цепи	k_2 при подаче, т/ч					
	5	10	20	30	40	50
Втулочно-роликовая	2,2	1,6	1,2	1,1	1,0	1,0
Крючковая (скользящая)	4,2	3,0	2,2	1,8	1,5	1,2

Горизонтальный скребковый транспортер для зерна с погруженными скребками. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{\text{г.с.т}} = \frac{p_1 Lv + p_2 LQ}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.59)$$

где p_1 — удельная мощность для перемещения тягового органа длиной $L = 1$ м по горизонтали со скоростью $v = 1$ м/с, кВт/(м²·с) [для зерна и зернопродуктов принимают $p_1 = 0,08$ кВт/(м²·с)]; p_2 — удельная мощность для перемещения продукта при подаче транспортера 1 т/ч на расстояние 1 м в горизонтальном направлении, кВт/(м·т/ч) [для зерна принимают $p_2 = 0,0027$ кВт/(м·т/ч), для муки — $p_2 = 0,003$ кВт/(м·т/ч)].

Винтовой транспортер (шнек) для зерна. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{в.т} = 9,81 \frac{k_1 Q (L k_2 + H)}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.60)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при пуске, $k_1 = 1,2 \dots 1,5$; Q — подача транспортера, кг/с; L — длина горизонтальной проекции транспортера (длина перемещения продукта), м; k_2 — коэффициент сопротивления движению, для зерна и зернопродуктов, $k_2 = 1,2 \dots 1,85$; H — высота подъема, м; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Инерционный транспортер для зерна. Он представляет собой желоб, совершающий возвратно-поступательные колебания под действием приводного механизма. Благодаря этому продукт передвигается по нему. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{и.т} = \frac{p_1 Q L}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.61)$$

где p_1 — удельная мощность для перемещения продукта при подаче транспортера 1 т/ч на расстояние 1 м по горизонтали, кВт/(м·т/ч), обычно принимают $p_1 = 0,03$ кВт/(м·т/ч); Q — подача транспортера, т/с; L — длина перемещения продукта, м; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Передвижной ленточный транспортер для зерна и минеральных удобрений, имеющих небольшую длину ленты (до 5...7 м между центрами барабанов). Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{п.л.т} = \frac{(k_1 k_2 L_1 v + 15 \cdot 10^{-5} Q L_2 + 27 \cdot 10^{-4} Q H) k_3}{\eta_{пер}}, \quad (2.62)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий конструкцию подшипников (для опор скольжения $k_1 = 1,25$; для опор качения $k_1 = 1,0$); k_2 — коэффициент, учитывающий ширину ленты, $k_2 = 0,03$ В; V — ширина ленты, м; L_1 — длина горизонтальной проекции транспортера (длина перемещения продукта), м; v — скорость ленты, м/с; Q — подача транспортера, т/ч; L_2 — длина транспортера, м; H — высота подъема материала, м; k_3 — коэффициент, зависящий от длины ленты транспортера (если длина ленты транспортера меньше 15 м, то принимают $k_3 = 1,25$); $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП для передвижных ленточных транспортеров длиной до 20 м

$$P_{п.л.т} = \frac{k L_2 B v + (39 \cdot 10^{-5} L_2 + 30 \cdot 10^{-4} H) Q}{\eta_{пер}}. \quad (2.63)$$

Значения коэффициента k принимают по таблице 2.7.

2.7. Коэффициент k

Месторасположение привода транспортера	k
У приводного барабана	0,080
У натяжного барабана	0,085
В середине транспортера	0,090

Ковшовый элеватор (нория) для зерна. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{к.э} = \frac{9,81QH \cdot 10^{-3}}{\eta_n \eta_{пер}}, \quad (2.64)$$

где Q — подача норрии, кг/с; H — высота норрии, м; η_n — КПД норрии (с учетом сопротивления в подшипниках норрии, на изгиб ленты, на зачерпывание продукта ковшами и т. д.); $\eta_{пер}$ — КПД передачи (табл. 2.8).

2.8. Коэффициент полезного действия норрии

Подача норрии, Q , т/ч	КПД норрии при высоте H , м					
	60	50	40	30	20	10
50	—	—	0,67	0,64	0,56	0,43
100	—	0,72	0,69	0,65	0,58	0,45
175	0,75	0,73	0,7	0,67	0,61	0,48
350	0,85	0,83	0,77	0,77	0,71	0,59
500	0,86	0,84	0,78	0,78	0,72	0,61

Принимают $\eta_n = 0,4...0,5$ для норрий, у которых $Q < 20$ т/ч и $H < 20$ м. Используют электродвигатели серии 4А и АИР.

Щеточные машины для очистки поверхности зерна. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{щ.м} = p_1 Q / \eta_{пер}, \quad (2.65)$$

где p_1 — удельный расход энергии; $p_1 = 0,7...0,9$ кВт·ч/т; Q — производительность, т/ч; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Жерновой постав с вертикальной осью. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_{ж.п} = \frac{k_3 k_1 Q \pi D n}{\eta_{пер} \cdot 60}, \quad (2.66)$$

где k_3 — коэффициент запаса; k_1 — коэффициент, зависящий от диаметра жернова, Н/(кг/с), для жерновов диаметром 0,9...1,4 м принимают $k_1 = 2,0...4,0$ Н/(кг·с),

при этом меньшие значения относят к меньшим диаметрам; Q — производительность, кг/ч; D — диаметр жернова, м; n — частота вращения жернова, мин⁻¹; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Электрооборудование и автоматизация зерносушильных пунктов. При автоматизации агрегатов зерносушильных пунктов управление машинами и механизмами дистанционное. В схеме предусмотрены цепи блокировок и сигнализации. Сигнализация облегчает наблюдение за ходом процесса и работой оборудования.

Топка зерносушилки — один из основных агрегатов зерносушильной линии. Для управления работой топки на жидком топливе служат автоматические устройства (рис. 2.69).

Топку включают в работу выключателем *SA2*. Подается напряжение на реле времени *KT1* и *KT2*. Исполнительный механизм запальника *ИИМ* выдвигает спираль накаливания из защитного чехла. Спираль присоединена к понижающему трансформатору *ТВ*. В течение периода, определяемого выдержкой реле времени *KT1*, происходит продувка топки при включенном запальнике. Контакт *KT1:1* включает электромагнитный привод *ЗИМ* топливного клапана и *ЗИМ* привода заслонки вентилятора, переводя ее в положение «Закрыто». Поступающее топливо распыляется форсункой, и смесь топлива с воздухом воспламеняется от соприкосновения со спиралью запальника.

При появлении пламени срабатывает устройство его контроля *КС1*, которое контактами *КС1:1* отключает зажигание и питание реле времени *KT1* и *KT2*, а контактами *КС1:3* — привод *ЗИМ* заслонки вентилятора. Под действием пружины заслонка открывается, подача воздуха, необходимого для полного сгорания смеси, увеличивается. Замыканием контактов *КС1:2* обеспечивается питание электромагнитного топливного клапана *ЗИМ*.

Если воспламенение топлива не произошло, то срабатывает реле *KT2* и контактом *KT2:1* включает промежуточное реле *KL1*, которое контактом *KL1:2* отключает вентилятор топки, топливный клапан *ЗИМ* и электромагнит привода воздушной заслонки *ЗИМ*, а контактом *KL1:1* обесточивает катушку *KM1*. Контакт *KM1:1* отключает устройство зажигания и реле времени *KT1*.

Для того чтобы повторно разжечь топку, выключателем *SA2* выводят из цепи тока реле *KT2* и снова включают питание пусковой системы.

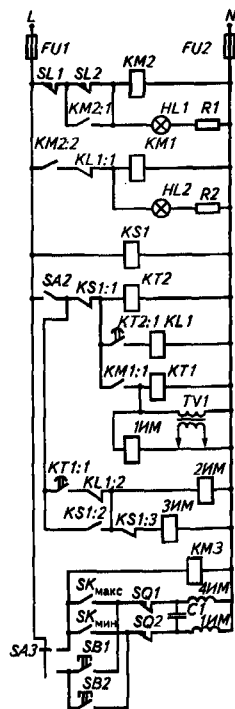


Рис. 2.69. Схема электрическая управления топкой

Если пламя гаснет во время работы, то контакты $\Phi 1$ замыкаются и происходит автоматический пуск с последовательностью первого варианта.

Когда в топке установился рабочий режим, переключателем $SA3$ включают систему регулирования температуры теплоносителя. В случае превышения температуры теплоносителя по отношению к заданной замыкаются контакты $SK_{\text{макс}}$ и исполнительный механизм с двигателем $4ИМ$ уменьшает подачу топлива. При замыкании контактов $SK_{\text{мин}}$ подача топлива увеличивается. Пределы изменения подачи топлива ограничиваются конечными выключателями $SQ1$ и $SQ2$. Пусковыми кнопками $SB1$ и $SB2$ регулируют подачу топлива во время наладки схемы. Уровень топлива в промежуточной баке контролируется датчиками $SL1$ и $SL2$, воздействующими на магнитный пускатель $KM2$ топливного насоса. Размыкающие контакты датчика нижнего уровня $SL2$ шунтируются блок-контактами $KM2:1$ магнитного пускателя $KM2$. Насос работает до тех пор, пока под воздействием топлива контакты датчика верхнего уровня $SL1$ не разомкнутся.

2.8.2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ, УБОРКИ НАВОЗА, ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК И УСТАНОВОК ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ МОЛОКА

Электрооборудование и автоматизация машин и механизмов для приготовления кормов. Машины для кормоприготовления, как правило, имеют несколько рабочих органов: транспортирующих, дробящих, режущих, прессующих, смешивающих, трясущих и др. Чем сложнее кинематическая схема машины и большая мощность приходится на долю транспортирующих устройств, тем выше момент трогания машины. Момент инерции у таких машин, как правило, высокий, особенно у дробилок и измельчителей грубых кормов. Нагрузка машин этой группы носит случайно-переменный характер. Частота и размах колебаний нагрузки зависят от многих факторов и, прежде всего, от физико-механических свойств обрабатываемого материала, частоты вращения рабочих органов, производительности машины, способа загрузки.

Дробилка. В целях лучшего усвоения кормов их предварительно измельчают. Для измельчения фуражного зерна и грубых кормов используют дробилки разных конструкций.

Мощность дробильной машины, кВт,

$$P_{\text{др}} = \frac{k_1 A Q}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.67)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий потери холостого хода, включая расход

мощности на вентиляцию (обычно принимают $k_1 = 1,15 \dots 1,2$); A — удельная энергия, расходуемая на измельчение материала, кДж/кг; Q — производительность дробилки, кг/с; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Удельная энергия, расходуемая на измельчение материала, кДж/кг,

$$A = k_2 k_3 [k_4 g \lambda^3 + k_5 (\lambda - 1)], \quad (2.68)$$

где k_2 — коэффициент, учитывающий влияние влажности материала по отношению к исходной 14%-ной влажности, $k_2 = 1 + k_6(B - 14)$; k_6 — коэффициент, $k_6 = 0,06 \dots 0,075$; B — относительная влажность зерна, %; k_3 — коэффициент, учитывающий затраты энергии, обусловленные неоднородностью материала, а также принцип воздействия рабочих органов машины на материал; k_4 — коэффициент, характеризующий работу на деформацию корма до начала текучести, кДж/кг; λ — степень измельчения корма, $\lambda = D_{экр}/d$, $D_{экр}$ — средний размер частиц исходного материала, d — средний размер частиц измельченного корма; k_5 — коэффициент, характеризующий работу на измельчение корма от предела текучести до разрушения, кДж/кг.

Значения $D_{экр}$, k_3 , k_4 , k_5 приведены в таблице 2.9.

2.9. Величины для расчета удельной энергии

Культура	$D_{экр}$, см	k_3	k_4 , кДж/кг	k_5 , кДж/кг
Ячмень	4,2	$1,20 \pm 0,30$	8,50	7,50
Овес (без пленок)	3,7	$5,00 \pm 1,50$	2,34	1,96
Рожь	3,3	$1,45 \pm 0,35$	8,40	6,40

Эквивалентный диаметр $D_{экр}$ зерна, принимаемого в форме шара,

$$D_{экр} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}, \quad (2.69)$$

где V — средний объем одного зерна, найденный на основании измерения объема 100 зерен путем погружения в бензин, толуол, ксилол.

Электрическая схема управления безрешетной дробилкой типа ДБ показана на рисунке 2.70.

Измельчаемое зерно с помощью шнека $M3$ загружают в бункер, уровень в котором автоматически поддерживается на основе информации от двух датчиков $SL1$ и $SL2$. Подачу зерна на измельчение регулируют заслонкой. Измельченное зерно, прошедшее решетный сепаратор, — это готовый продукт, который удаляют выгрузным шнеком ($M1$).

Схема управления дробилкой (см. рис. 2.70) обеспечивает последовательный пуск электродвигателей выгрузного шнека $M1$ и затем дробилки $M2$. Для снижения пускового тока электродвигатель дробилки включается сначала по схеме «звезда», а затем переключается на схему «треугольник». Загрузочный шнек $M3$ запус-

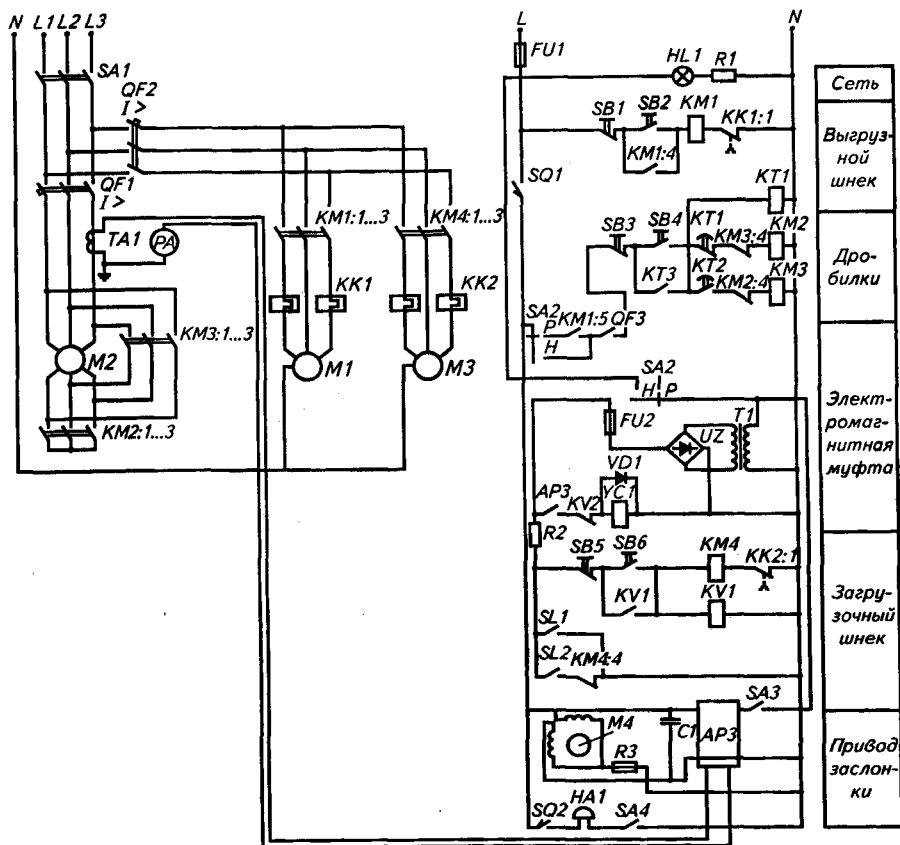


Рис. 2.70. Схема управления дробилкой ДБ-5:

M1 — двигатель выгрузного шнека; *M2* — двигатель дробилки; *M3* — двигатель загрузочного шнека; *SL1* и *SL2* — датчики верхнего и нижнего уровня соответственно; *SQ1* и *SQ2* — конечные выключатели; *AP3* — автоматический регулятор загрузки

кают, нажимая кнопку *SB6* при незаполненном бункере дробилки. Шнек работает до момента замыкания контактов *SL1* мембранного датчика верхнего уровня зерна в бункере. Магнитный пускатель *KM4* и реле *KV* отключаются при замыкании контакта *SL1*. Повторный пуск шнека происходит также автоматически после опорожнения бункера и размыкания контактов датчиков верхнего *SL1* и нижнего *SL2* уровней. Производительность дробилки регулируется автоматически в зависимости от силы тока, потребляемого электродвигателем дробилки *M2* с помощью регулирующей заслонки, перемещаемой исполнительным механизмом *M4* по команде автоматического регулятора загрузки *AP3*.

При значительных перегрузках двигателя и перерывах в электропитании электромагнитная муфта $УС$, соединяющая заслонку с ИМ, отключается контактом $APЗ$, заслонка падает под действием собственного веса и подача зерна в дробильную камеру прекращается.

Полное открытие заслонки, свидетельствующее о снижении загрузки дробилки, сигнализируется сиреной HA при замыкании конечного выключателя $SQ2$.

Для измельчения сена и соломы применяют измельчители штифтового, ножевого или молоткового типа.

Схема управления обеспечивает сначала последовательный пуск двигателей дробилки и затем через 20 с — бункера. Пуск дробилки происходит с переключением двигателя со схемы «звезда» на схему «треугольник». В случае перегрузки двигателя дробилки на время менее 20 с отключается электромагнитная муфта и прекращается подача корма в дробилку. После снижения загрузки дробилки подача корма возобновляется. Если перегрузка двигателя длится более 20 с, то электродвигатель привода бункера отключается.

Соломосилосорезки. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП соломосилосорезки

$$P_{cc} = \frac{P_{рез} + P_{под} + P_{х.х}}{\eta_{пер}} 10^{-3} = \frac{5P_{рез}}{3\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.70)$$

где $P_{рез}$ — мощность, расходуемая на резание корма, Вт; $P_{под}$ — мощность, расходуемая на привод механизма подачи, Вт; $P_{х.х}$ — мощность холостого хода машины, Вт; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Мощность резания $P_{рез}$, Вт, определяется силой F и скоростью резания v :

$$P_{рез} = Fv \approx kabzn,$$

где k — число ножей; a и b — высота и ширина горловины, м; z — интенсивность распределенной нагрузки резания материала на единицу длины лезвия (принимают $z = 3500 \dots 5000$ Н/м); n — частота вращения ножей, c^{-1} .

Измельчители кормов. При измельчении грубых кормов улучшается их поедаемость животными. В северных и северо-западных районах страны солому измельчают, используя соломосилосорезки, в южных — при помощи специальных измельчителей типа ИГК.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП измельчителя кормов

$$P_{и.к} = \frac{k_{х.х}AQ}{\eta_{пер}}, \quad (2.71)$$

где $k_{х.х} = 1,15 \dots 1,2$ — коэффициент, учитывающий потери холостого хода; A — удельная энергия, расходуемая на измельчение кормов, кВт·ч/т [на основании экс-

периментальных данных при измельчении зеленой массы (сочные корма), соломы, сена (грубые корма) $A = 1,7...8$ кВт·ч/т, при измельчении корнеплодов $A = 1,2...1,3$ кВт·ч/т]; Q — производительность, т/ч; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Пневмотранспортер с вентилятором-швырялкой для измельченных кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП пневмотранспортера-швырялки, т. е. вентилятора, у которого весь погружаемый материал проходит через рабочее колесо,

$$P_{п.к} = \frac{p_1 Q H}{\eta_{пер}}, \quad (2.72)$$

где $p_1 = 0,15...0,37$ — удельная мощность, кВт/(м·кг/с); Q — подача вентилятора-швырялки, кг/с; H — высота транспортирования, в пределах от 14...15 до 25...30 м, $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Электровибротрамбовщик для уплотнения силосной массы. Средняя мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП электровибротрамбовщика с одним вибратором

$$P_3 = \frac{k m_1^2 \theta^3 \omega^2 \sin \psi \cdot 10^{-3}}{2 m_2 \eta_{пер}}, \quad (2.73)$$

где k — коэффициент, зависящий от упругости и вязкости силосной массы (табл. 2.10); m_1 — масса дебаланса, кг; θ — эксцентриситет дебаланса, м; ω — угловая скорость массы дебаланса вокруг оси вибратора (частота колебаний), рад/с; ψ — угол сдвига фаз между возмущающей силой (в данном случае вертикальная слагающая центробежной силы) и деформацией среды (табл. 2.10); m_2 — масса вибратора, кг; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

2.10. Значения коэффициента k и $\sin \psi$, полученные экспериментально

Параметр	Частота колебаний вибратора, мин ⁻¹		
	400	500	600
k	1,5...2,5	1,3...1,9	1,2...1,4
$\sin \psi$	0,48...08	03...0,5	0,2...0,35

Частота колебаний вибратора должна быть несколько выше, чем резонансная частота системы вибратор — силосная масса, равная 275...325 мин⁻¹.

При использовании для электровибротрамбовщика двух вибраторов вместо одного суммарная мощность двух электродвигателей

$$P_{\Sigma} \geq 1,2P, \quad (2.74)$$

где P — средняя мощность электродвигателя электровибротрамбовщика с одним вибратором, кВт.

Пастоизготовитель шнековый для силоса и травы. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП пастоизготовителя

$$P_{п.ш} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\eta_{пер}}, \quad (2.75)$$

где P_1 — мощность, расходуемая на работу прессующего шнека, кВт; P_2 — мощность, расходуемая на процесс измельчения, кВт; P_3 — мощность холостого хода пастоизготовителя, кВт; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Отдельные составляющие мощности

$$P_1 = A_n Q \cdot 10^{-3};$$

$$P_2 = A_{изм} S_p \cdot 10^{-3};$$

$$P_3 = (0,1 \dots 0,15)(P_1 + P_2),$$

где A_n — удельная энергия, расходуемая на подвод к ножам и уплотнение измельчаемой массы, кДж/кг; $A_{изм}$ — удельная энергия, расходуемая на перерезание корма, кДж/м²; S_p — площадь поверхности раздела, м²/кг (для отверстий диаметром 16 мм принимают $S_p = 0,9 \dots 1,0$ м²/кг); Q — производительность пастоизготовителя, кг/с.

Барабанная корнеклубнемойка. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП барабанной корнеклубнемойки определяют по эмпирической формуле

$$P_{б.к} = \frac{0,0045n + 0 \cdot 2Q}{\eta_{пер}}, \quad (2.76)$$

где n — частота вращения барабана, мин⁻¹; Q — производительность корнеклубнемойки, т/ч; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Винтовая корнеклубнемойка. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП винтовой (шнековой) корнеклубнемойки

$$P_{в.к} = \frac{[(P_1 + P_2)i + P_3 + P_4] \cdot 10^{-3}}{\eta_{пер}}, \quad (2.77)$$

где P_1 — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления трения корнеклубнеплодов о корпус и на их подъем по наклону, кВт; P_2 — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления трения корнеклубнеплодов в шнеке, кВт; P_3 — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления в упорном подшипнике или пяте, кВт; P_4 — мощность, расходуемая на преодоление сопротивления трения в радиальных подшипниках, кВт; i — коэффициент, учитывающий потери мощности на перемешивание; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Отдельные составляющие мощности нагрузки, кВт, на валу ЭП

$$P_1 = 9,81Q(f_1 L_0 + H)10^{-3};$$

$$P_2 = 9,81Q(f_1 L_0 + H) \frac{f_2 \pi D_2}{s} 10^{-3};$$

$$P_3 = 9,81Q(f_1 L_0 + H + \frac{q_0}{q_m} H) \frac{f_3 \pi D_1}{s} 10^{-3};$$

$$P_4 = 9,81q_0 L_0 f_4 \pi d_u n \cdot 10^{-3},$$

где Q — производительность корнеклубнемойки, кг/с; f_1, f_2 — коэффициенты трения корнеплодов соответственно в желобе и шнеке; f_3, f_4 — коэффициенты трения соответственно в упорном и радиальных подшипниках; L_0 — длина горизонтального перемещения корнеплодов, м; H — высота подъема, м; D_2 — внешний диаметр шнека, м; D_1 — диаметр вала шнека ($D_1 = 0,2...0,35 D_2$), м; s — шаг винта шнека, м; q_0 — коэффициент, учитывающий массу вращающихся частей шнека мойки на единицу его длины, кг/м; q_m — коэффициент, учитывающий массу материала на единицу длины желоба, кг/м; d_u — диаметр цапф вала, м; n — частота вращения шнека, с⁻¹.

Кулачковая корнеклубнемойка. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП кулачковой корнеклубнемойки

$$P_{к.к} = \frac{kQl}{\eta_{пер}}, \quad (2.78)$$

где k — удельный расход энергии на единицу длины мойки, кДж/(кг·м), принимают равным 0,22 кДж/(кг·м) для моек производительностью 1,4...1,7 кг/с и 0,15 кДж/(кг·м) для моек производительностью свыше 1,7 кг/с; Q — производительность, кг/с; l — общая длина моечной ванны, м.

Центробежная мойка. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП центробежной мойки

$$P_{ц.м} = \frac{3,3QfD\omega k_v}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.79)$$

где Q — производительность, кг/с; t — время мойки корнеплодов в моечном цилиндре, $t = 60...90$ с; f — коэффициент трения корнеклубнеплодов; D — диаметр моечного цилиндра, м; ω — угловая скорость моечного диска, рад/с; $k_v = 0,3...0,4$ — коэффициент, учитывающий вращательное движение корнеклубнеплодов.

Корнеклубнеперезка. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП корнеклубнеперезки

$$P_k = \frac{k_{х.х}AQ}{\eta_{пер}}, \quad (2.80)$$

где $k_{х.х} = 1,15...1,2$ — коэффициент, учитывающий потери холостого хода;

A — удельная энергия, расходуемая на дробление (на основании экспериментальных данных $A = 0,65 \dots 1,0$ кВт·ч/т); Q — производительность корнеклубнеуборочной машины, т/ч; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Лопастной смеситель кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП смесителя

$$P_{л.с} = 0,43zD^{4,56}n^{2,78}, \quad (2.81)$$

где z — число лопастей; D — диаметр крыльчатки, м; n — частота вращения вала мешалки смесителя, мин⁻¹.

Автоматическая настройка дозатора кормов. Для дозирования корма применяют автоматическую настройку дозатора по программе, которая обеспечивает постоянное значение подачи вне зависимости от физических свойств корма. Функциональная схема этого устройства показана на рисунке 2.71.

Команда на изменение подачи дозатора подается в программное устройство, и дозатор перенастраивается с помощью управляющего устройства. Специальное устройство контролирует работу дозатора и постоянно поддерживает в требуемом диапазоне параметры программного устройства.

Барабанный дозатор кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП дозатора

$$P_{б.д} = \frac{p_n S t g \phi_0 \pi D k_1 k_2 \omega}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.82)$$

где p_n — давление корма на поверхность барабана, Па; S — площадь горизонталь-

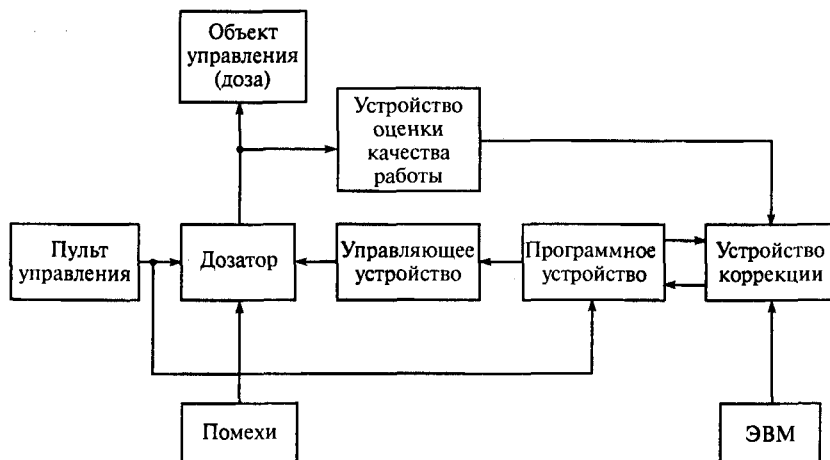


Рис. 2.71. Функциональная схема автоматической настройки дозатора

ного сечения горловины бункера над барабаном, m^2 ; ϕ_0^1 — угол естественного откоса корма при движении, град; D — диаметр барабана, м; k_1 — коэффициент, учитывающий сопротивление корма дроблению (для порошкообразных и мелкозернистых продуктов $k_1 = 1,0$; для кусковых легко распадающихся продуктов $k_1 = 2,0$); $k_2 = 1,1 \dots 1,2$ — коэффициент, учитывающий потери на трение рабочих органов дозатора; ω — угловая скорость барабана, рад/с (обычно частота вращения барабана не должна превышать $30 \dots 40 \text{ мин}^{-1}$); $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

Ленточный дозатор кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП дозатора

$$P_{\text{л.д}} = \frac{P_1 + P_2}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.83)$$

где P_1 — мощность, необходимая на подачу корма, кВт; P_2 — мощность, необходимая на преодоление трения продукта о желоб, кВт.

При этом

$$P_1 = 9,81 Q(0,2L + H)k_1 \cdot 10^{-3};$$

$$P_2 = h^2 l \gamma f k_{\text{п}} v \cdot 10^{-3},$$

где Q — подача дозатора, кг/с; L — длина дозатора, т. е. расстояние между осями барабана, м; H — высота подъема корма, м (для наклонных дозаторов); k_1 — коэффициент, учитывающий сопротивление барабанов, перегибы ленты и т. д., $k_1 = 1,2$; h — высота слоя корма на ленте, м; l — длина бортов, м; γ — плотность корма, кг/м^3 ; f — коэффициент трения корма о борт; $k_{\text{п}}$ — коэффициент подвижности

корма, $k_{\text{п}} = \frac{1 - \sin \phi_0^1}{1 + \sin \phi_0^1}$; ϕ_0^1 — угол естественного откоса корма при движении, град;

v — скорость движения транспортера, м/с.

Шнековый дозатор кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП дозатора

$$P_{\text{ш.д}} = \frac{9,81 Q(L_Z k_1 + H)k_2}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.84)$$

где Q — подача дозатора, кг/с; L_Z — горизонтальная проекция пути корма, м; k_1 — коэффициент сопротивления перемещению корма в корпусе дозатора, $k_1 = 1,2 \dots 2,5$; H — высота подъема корма, м; k_2 — коэффициент, учитывающий потери на трение в подшипниках, $k_2 = 1,1 \dots 1,2$; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

Тарельчатый дозатор кормов. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП дозатора

$$P_{\text{т.д}} = \frac{Fv}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3} = \frac{\left(9,81 \frac{h^2}{2 \text{tg} \phi_0^1} s f_1 \gamma \right) \left(\frac{2\pi R_0 n}{60} \right)}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3},$$

ИЛИ

$$P_{\text{т.д}} = \frac{9,81h^2 s R_0 \omega f_1 \gamma}{2 \text{tg} \varphi'_0 n_{\text{пер}}} (1 + f_2 \cos \beta) k \cdot 10^{-3},$$

где F — сила трения, возникающая при движении материала по дну, Н; v — скорость движения материала, сбрасываемого с диска, м; s — перемещение корма с момента поступления из бункера и до сброса его скребком с диска, м; R_0 — расстояние между центром тяжести радиального сечения корма, лежащего на диске, и

осью вращения, м, $R_0 = R + \frac{h}{3 \text{tg} \varphi'_0}$; R — радиус кожуха, перекрывающего выходной

патрубок бункера и регулирующего толщину слоя корма на диске, м; φ'_0 — угол естественного откоса корма при движении, град; ω — угловая скорость диска, рад/с; f_1 — коэффициент трения корма о диск; γ — плотность корма, кг/м³; β — угол установки скребка к плоскости сечения кольца корма, град; f_2 — коэффициент трения корма о скребок; k — коэффициент, учитывающий другие сопротивления, $k = 1,5 \dots 2,0$.

Поилки для животных. Для поения животных используют индивидуальные и групповые поилки. Одной индивидуальной поилки достаточно для поения от 9 до 15 особей. Групповая поилка для наружной установки оборудована системой электроподогрева мощностью до 1 кВт и предназначена для обслуживания до 200 животных. Такая поилка работает по принципу сообщающихся сосудов. Функциональная схема поилки показана на рисунке 2.72.

Поплавковый регулятор поддерживает заданный уровень воды в чашах поилок. Специальный клапан препятствует попаданию воды из соседней поилки в опорожненную. Это обеспечивает снижение уровня заражения инфекционными заболеваниями животных.

Поточные линии приготовления кормов. Для автоматизации процессов приготовления кормов промышленность выпускает агрегат АДС-2. Он предназначен для приготовления овощных смесей с добавками зерна, минералов. На рисунке 2.73 приведена электрическая схема управления этим агрегатом.

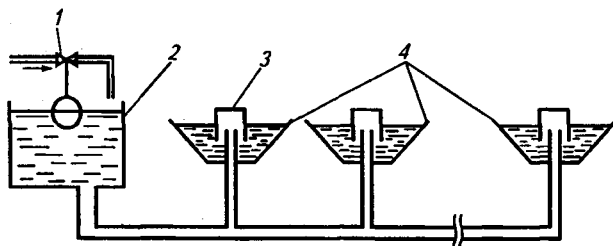


Рис. 2.72. Поилка для животных:

1 — регулятор уровня; 2 — напорный бак; 3 — клапан; 4 — чаши поилок

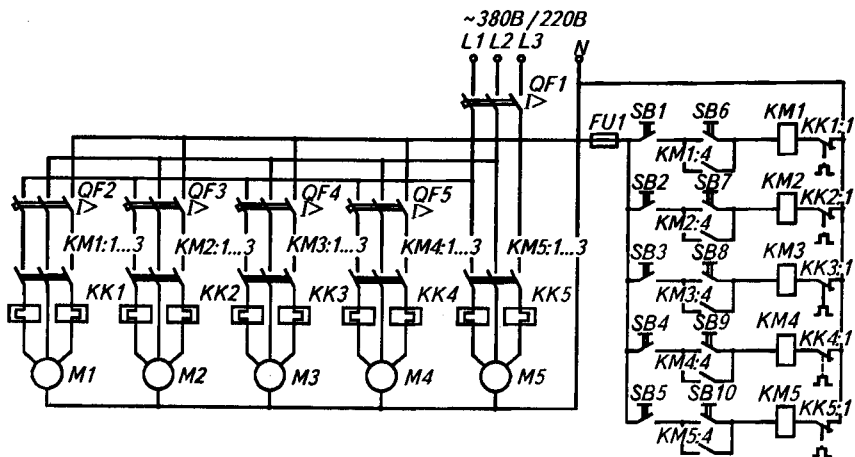


Рис. 2.73. Электрическая схема клубнеобрабатывающего агрегата АДС-2

Агрегат АДС-2 имеет пять электродвигателей, из которых *M1* приводит в движение выгрузной шнек, *M2* и *M3* — линию смешивания, а *M4* и *M5* — дробилки. Схемой предусмотрено самостоятельное включение каждого электродвигателя, но при нормальной работе агрегата вначале включают электродвигатель выгрузного шнека *M1* нажатием кнопки *SB6*, а затем последовательно пускают другие электродвигатели машин в направлении пр о т и в движения продукта. Отключают электродвигатели машин агрегата последовательно по н а п р а в л е н и ю движения продукта. При этом обеспечивают выдержку времени для освобождения каждой машины от продукта.

Электрооборудование и автоматизация машин и механизмов для раздачи кормов. Существует широкий спектр технологий механизированной раздачи кормов на фермах и комплексах. Выбор того или иного способа механизации раздачи кормов зависит от размеров фермы, технологии содержания скота, рациона кормления и многих других факторов.

Наиболее эффективны при скармливании силоса и сенажа мобильные кормораздатчики, так как их применение исключает затраты труда на перевалочные операции. Мобильные кормораздатчики доставляют корма в помещения и раздают их. Расстояние действия мобильных кормораздатчиков, приводимых в движение электродвигателями, зависит от длины питающего кабеля или троллеев.

Стационарные раздатчики кормов в зависимости от типа рабочего органа подразделяют на *скребковые*, *шнековые* и *ленточные*. Такой же классификации подвергнуты и транспортеры.

Автоматизированные системы раздачи корма должны обеспечить: последовательность включения машин и механизмов в порядке, обратном направлению движения корма в линии, что необходимо для исключения перегрузки линии кормом; остановку линии в требуемой последовательности в случае аварийной паузы в работе одной из машин; контроль и сигнализацию работы механизмов.

Для раздачи кормов на фермах используют самоходные, движущиеся по рельсам и стационарные электрифицированные раздатчики кормов (кормораздатчики).

Кормораздатчик колебательного типа для птиц. Перемещение корма происходит в результате возвратно-поступательного (колебательного) движения кормушек. При движении транспортера от питающего бункера скорость его меньше, чем при движении к бункеру, вследствие чего корм передвигается по желобу в одном направлении.

Каждая линия (один желоб) кормораздатчика имеет самостоятельный электропривод.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП колебательного транспортера одной линии (одного желоба)

$$P_{к.т} = \frac{9,81Qlf}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.85)$$

где Q — подача одной линии раздатчика, кг/с; l — длина раздатчика, м; f — коэффициент трения ленты о желоб (для деревянных желобов $f = 0,4 \dots 0,7$; стальных — $f = 0,35 \dots 0,6$); $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Мобильный кормораздатчик. Мощность нагрузки, кВт, на валу электропривода передвижения вагонетки

$$P_{м.к} = \frac{F_T v}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.86)$$

где F_T — тяговое сопротивление транспортной единицы, $F_T = F_0 + F_{кр} + F_i$; F_0 — сопротивление на прямолинейном горизонтальном пути, Н, $F_0 = f_0 m$; f_0 — коэффициент сопротивления передвижению кормораздатчика на прямолинейном горизонтальном участке пути, Н/кг, $f_0 = 0,12 \dots 0,2$; m — масса транспортной единицы с грузом, кг; $F_{кр}$ — дополнительное сопротивление на закруглении пути, Н, $F_{кр} = fm$; f — коэффициент дополнительного сопротивления на закруглении пути, Н/кг, $f = 0,25/R$; R — радиус закругления дороги, м; F_i — дополнительное сопротивление на подъеме, Н, $F_i = 9,81 m \sin \alpha$; α — угол подъема дороги; v — скорость движения, м/с, $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

При движении под уклон составляющая F_i направлена в сторону движения и будет не сопротивлением, а тяговой силой. Поэтому в формуле расчета в этом случае F_i имеет отрицательное значение.

При выборе мощности во внимание принимают прежде всего основное сопротивление F_0 ; последующую проверку на перегрузку ведут с учетом большего дополнительного сопротивления (F_i или $F_{кр}$) или с учетом обоих сопротивлений, если закругление выполнено на подъеме.

Ленточный кормораздатчик. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП ленточного кормораздатчика

$$P_{л.к} = \frac{F_c v}{\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.87)$$

где F_c — суммарное сопротивление движению, Н; v — скорость ленты, м/с; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Суммарное сопротивление движению

$$F_c = F_{пр} + F_6 + F_{зар} + F_{разг},$$

где $F_{пр}$ — сопротивление движению на прямолинейном участке, Н; F_6 — сопротивление движению при огибании барабанов, Н; $F_{зар}$ — сопротивление от загрузки материала на ленту, Н; $F_{разг}$ — сопротивление от плужкового сбрасывателя, Н.

Сопротивление движению на прямолинейном участке зависит от опоры ленты, которая может быть выполнена в виде роликов или настила.

Сопротивление движению, Н, на прямолинейном участке кормораздатчика по роликовым опорам

$$F_{п} = [g(q_r + q_l + q_p)\omega_p \cos\alpha + g(q_r + q_l)\sin\alpha]L,$$

где $g = 9,81$ м/с²; q_r — масса груза, приходящаяся на единицу длины транспортера, кг/м; q_l — погонная масса ленты, кг/м; q_p — погонная масса роликов грузовой ветви, кг/м; ω_p — коэффициент сопротивления движению ленты по роликам, равный 0,018...0,04; α — угол подъема, град; L — длина кормораздатчика, м.

Сопротивление движению, Н, на прямолинейном участке кормораздатчика по настилу

$$F_{п} = g(q_r + q_l)L(\omega_n \cos\alpha + \sin\alpha),$$

где ω_n — коэффициент сопротивления движению по настилу, равный коэффициенту трения между лентой и стальным настилом, принимают $\omega = 0,35...0,6$.

При определении сопротивления холостой ветви q_r принимают равным нулю.

Сопротивление движению, Н, при огибании барабанов

$$F_6 = \zeta S_{наб} k_6,$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления, равный 0,06...0,09; $S_{наб}$ — тяжение набегающей ветви ленты, Н; k_6 — число барабанов.

Сопротивление от загрузки материала на ленту

$$F = \frac{0,278Q(v_{л}^2 - v_{н}^2)}{v_{л}}, \quad (2.88)$$

где Q — подача кормораздатчика, т/ч; $v_{л}$ — скорость ленты; $v_{н}$ — начальная скорость груза.

Сопротивление от плужкового сбрасывателя пропорционально ширине B ленты

$$F_{разг} = 2,7gqB. \quad (2.89)$$

Применение электрооборудования в процессе раздачи кормов позволяет поднять производительность труда, улучшить процесс кормления животных, а следовательно, поднять их продуктивность.

На рисунках 2.74, 2.75 и 2.76 приведены схемы автоматического управления кормораздатчиками.

Стационарный кормораздатчик типа ТВК-80Б предназначен для распределения корма по фронту кормления и уборки отходов корма.

В схеме (см. рис. 2.74) предусмотрено ручное (P) и автоматическое ($У$) управление. Для раздачи кормов в течение суток используются сучное программное реле $KT2$ типа 2РВМ.

Схема работает следующим образом. Программное реле $KT2$ своим контактом $KT2:1$ включает магнитные пускатели $KM2$ и $KM3$ возврата ленты и транспортера отходов. При срабатывании концевого выключателя $SQ1$ лента кормораздатчика останавливается и одновременно контакт $KM2:2$ отключает транспортер отходов. При замыкании программным реле контактов $KT2:2$ включаются привод питателя $KM4$ и привод раздачи корма $KM1$.

При срабатывании концевого выключателя $SQ2$ в конце распределения кормов отключается магнитный пускатель $KM4$ привода питателя и с выдержкой времени пуска-

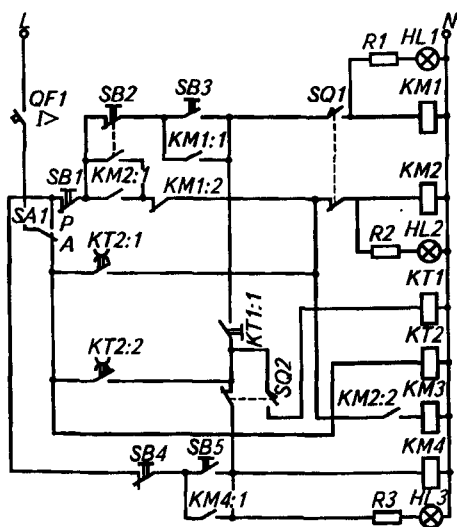


Рис. 2.74. Схема автоматического управления кормораздатчиком ТВК-80Б

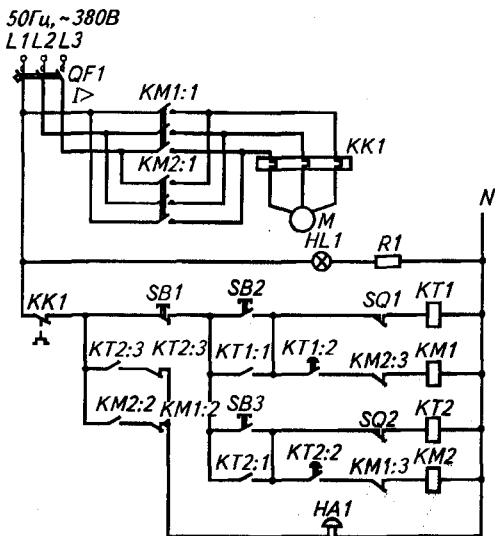


Рис. 2.75. Принципиальная электрическая схема раздатчика кормов РВК-Ф-74

времени — магнитный пускатель *KM1* электропривода *M*. При заполнении кормушки по всей длине срабатывает конечный выключатель *SQ1*, который отключает кормораздачу. Перед началом следующего кормления кнопкой *SB3* включают реле времени *KT2*, которое контактами *KT2:3* включает звуковой сигнал *HA1* и с выдержкой времени — магнитный пускатель *KM2* контактами *KT2:2*. Электропривод *M* возвращает ленту в исходное положение до размыкания контактов конечного выключателя *SQ2*. При этом лента очищается от остатков корма.

Для раздачи влажных кормовых смесей на небольших свинофермах используют кормораздатчик-смеситель типа КС. Кормораздатчик-смеситель КС (рис. 2.76, а) перемещается только по рельсовому пути, проложенному вдоль кормушек. Тележка и рабочие органы кормораздатчика приводятся в действие от четырех автономных электродвигателей.

В бункер 4 загружают компоненты влажной кормовой смеси. Разравниватель 5 равномерно распределяет корм по бункеру, а мешалки 6 и 7 перемешивают его. После завершения процесса перемешивания заслонки дозирующих устройств 3 с помощью штурвалов вручную устанавливают в положение, соответствующее заданной дозе корма. Нажимают кнопку *SB4* (рис. 2.76, б), и тележка от двигателя *M2* приходит в движение. При расположении выгрузных отверстий шнеков 2 над кормушками оператор нажимает пе-

тель *KM1* привода раздачи кормов.

Рассмотрим схему автоматического управления стационарного раздатчика кормов типа РВК, который предназначен для раздачи кормов всех видов, кроме жидких. Рабочий орган этого раздатчика может быть выполнен в виде ленты или скребкового полотна.

Корм из бункера равномерно транспортируется в кормушки с помощью электропривода *M* (см. рис. 2.75). Кнопкой *SB2* включают реле времени *KT1*, которое своими контактами *KT1:3* включает звуковую сигнализацию *HA1*, а контактами *KT1:2* с выдержкой

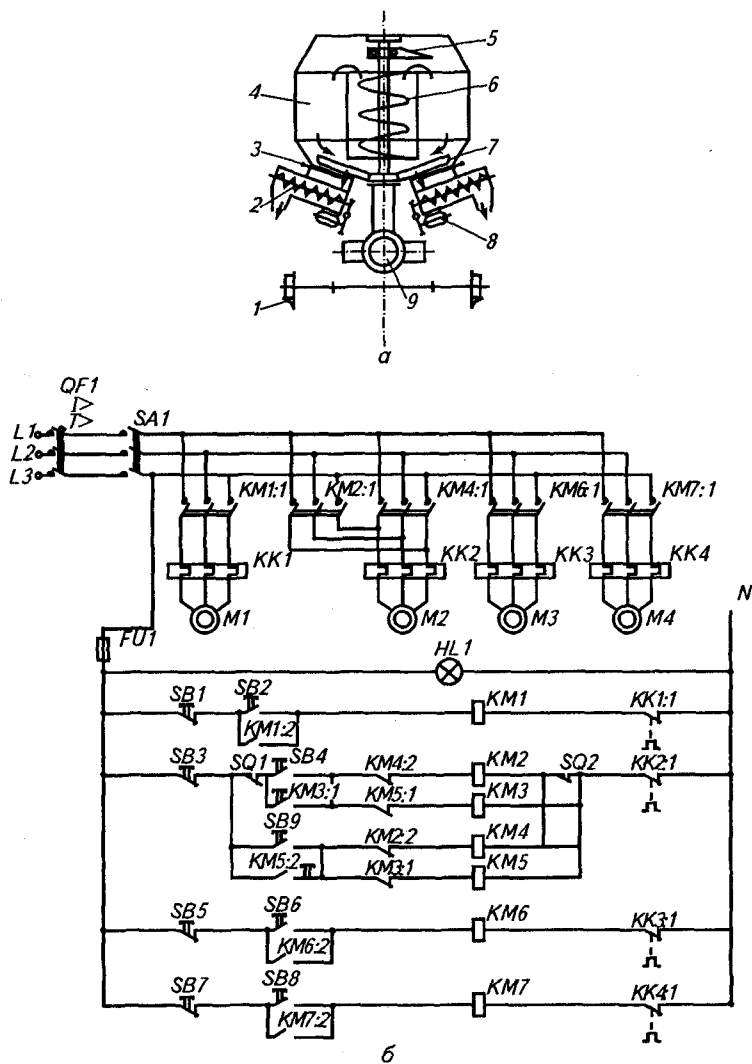


Рис. 2.76. Кормораздатчик-смеситель КС-1,5:

a — конструкция; *б* — принципиальная схема; 1 — рельсовый путь; 2 — выгрузной шнек; 3 — дозирующее устройство; 4 — бункер; 5 — разравниватель; 6, 7 — шнековая и лопастная мешалки; 8 — привод выгрузного шнека; 9 — мотор-редуктор

даль тормоза, размыкаются контакты конечного выключателя $SQ2$, отключается тяговый двигатель $M2$ раздатчика и под действием ленточного тормоза он останавливается. Раздача корма (в одну кормушку и в обе одновременно) происходит при нажатии кнопок $SB6$ и $SB8$ (двигатели $M3$ и $M4$).

При отпускании педали тормоза тяговой двигатель включается вновь уже без нажатия кнопки «Пуск», так как она шунтирована контактами магнитного пускателя $KM5$. Если на пути движения раздатчика встречается препятствие, то специальное устройство (шуп) действует на конечный выключатель $SQ1$, контакты которого разрывают цепи питания контакторов тягового двигателя. После опорожнения бункера кнопкой $SB3$ останавливают тяговый двигатель, кнопками $SB5$ и $SB7$ — шнеки и затем кнопкой $SB9$ переключают тяговый двигатель на обратный ход.

Электрооборудование и автоматизация машин и механизмов для уборки навоза. К основным операциям по уборке и удалению навоза из животноводческих помещений относят: уборку в стойлах, транспортирование навоза к местам хранения или переработки, хранение и утилизацию. Среди них наиболее автоматизирована операция по уборке навоза из животноводческих помещений.

Различают мобильные и стационарные способы удаления навоза.

Применение мобильных механизмов возможно не только для удаления навоза, но и для транспортирования его в навозохранилище или на открытую навозную площадку. В эту группу механизмов входят: скреперы, бульдозеры, прицепные тракторные тележки и электрифицированные монорельсовые вагонетки.

Как правило, стационарные механизмы используют в качестве рабочего органа замкнутую металлическую цепь со скребками или скрепер. По аналогичному принципу работает транспортер кругового движения ТСН-60.

На свиноводческих комплексах одна из важнейших проблем — утилизация навоза. На комплексе, где откармливается поголовье 180 тыс. свиней, масса жидкого навоза в год составляет 1 млн т, что соответствует хозяйственно-бытовым стокам города с населением в 250 тыс. человек и представляет собой большую экологическую проблему.

Многоскреперный навозоуборщик. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП навозоуборщика

$$P_{\text{м.н}} = \frac{Fv_{\text{ср}}}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.90)$$

где F — усилие для перемещения транспортера со скреперами в канале; H ; $v_{\text{ср}} = 0,2...0,4$ м/с — средняя скорость движения скреперов; $\eta_{\text{пер}} = 0,85...0,9$ — КПД передачи.

Усилие для перемещения транспортера со скреперами в канале, Н,

$$F = F_T + F_H + F_X,$$

где F_T — усилие, возникающее между транспортером со скреперами и транспортируемой массой, Н; F_H — усилие для перемещения навоза по каналу, Н; F_X — усилие на ходу транспортера, Н.

Усилие для перемещения горизонтального скреперного (скребкового) транспортера, Н:

$$F = 9,81(1+k)fM + F_{\text{зак}} \frac{L}{t} k_f + F_{x,x} L, \quad (2.91)$$

где k — условный коэффициент бокового давления, зависящий от размера канала и типа подстилки; f — коэффициент трения навоза о дно канала (табл. 2.11); M — масса транспортируемого навоза, кг, $M = BHp\rho\psi$; B — ширина канала, м; H — высота канала, м; ρ — плотность навоза, кг/м³; t — шаг скребка, м; ψ — коэффициент заполнения канала; $F_{\text{зак}}$ — усилие от заклинивания навоза между скребками и боковой стенкой канала, кг; принимают для навоза без подстилки $F_{\text{зак}} = 3,5$ Н; при торфяной подстилке — 3 Н, при соломенной подстилке — 1,5 Н; L — общая длина транспортера, м; k_f — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при образовании волочения (в зависимости от типа подстилки $k_f = 1 \dots 1,2$); $F_{x,x}$ — линейное усилие на холостом ходу транспортера (для скребкового транспортера кругового движения с деревянными скребками, уложенными в горизонтальный канал открытого исполнения, принимают равным 2 Н/м).

2.11. Коэффициент трения навоза влажностью 60...70 % в зависимости от материала поверхности канала и подстилки

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

Тросово-скреперный навозоуборщик с двумя скребками. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП навозоуборщика

$$P_{\text{т.с.н}} = \frac{Fv_{\text{ср}}}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.92)$$

где F — полное тяговое усилие скрепера, Н; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения скрепера, м/с, $v_{\text{ср}} = 0,3 \dots 0,4$ м/с; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи.

Для скреперной установки, работающей в двух навозных каналах,

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (2.93)$$

где F_1 — сопротивление движению рабочей ветви, Н; F_2 — сопротивление передвижению холостой ветви, Н; F_3 — динамическое усилие, Н; F_4 — натяжение набегающей ветви каната, Н.

Составляющие определяют по формулам:

$$F_1 = 9,81[(m + m_c)\beta_c + q_t L_T f_T];$$

$$F_2 = 9,81(m_c \beta_c + q_T L_T f_T);$$

$$F_3 = \frac{(2m_c + q_T)v_c}{t},$$

где m — масса порции навоза, кг; m_c — масса скрепера, кг; β — приведенный коэффициент сопротивления перемещению навоза и скрепера, $\beta = 1,2 \dots 2,0$; q_t — масса 1 м длины троса, кг/м, $q_T = 0,4$ кг/м; f_t — коэффициент трения троса о навоз, $f_t = 0,5 \dots 0,6$; L_T — длина троса, м; t — время разгона скреперов, с, $t = 1$ с.

Статическая нагрузка на один скрепер, Н, при работе в канавах шириной $0,8 \dots 0,9$ м

$$F = 9,81(k_c f m_H^1 + m_c f_c), \quad (2.94)$$

где $k_c = 0,8 \dots 1,0$ для бульдозерообразного скрепера с вертикальной стенкой, $k_c = 0,4 \dots 0,6$ для совковообразного скрепера, так как часть навоза находится на скрепере и не трется о дно канавки; f — коэффициент трения навоза о канавку, $f = 0,8 \dots 1,0$; f_c — коэффициент трения скрепера о канавку, $f_c = 0,4 \dots 0,5$; m_H^1 — масса одной порции навоза в скрепере, составляющая $100 \dots 200$ кг.

Цепочно-скребковый навозоуборщик. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП навозоуборщика

$$P_{\text{ц.с.н}} = \frac{Fv}{\eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.95)$$

где F — полное усилие на цепочно-скребковом транспортере, Н; v — скорость цепи, м/с ($v = 0,15 \dots 0,2$ м/с); $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи, $\eta_{\text{пер}} = 0,75 \dots 0,85$.

Полное сопротивление движению, Н, цепочно-скребкового транспортера

$$F = 9,81 \frac{Q_{\text{сут}}}{k_{y6}} k_n f_1 + L \left(\frac{F}{t_c} + m_T f_2 \cdot 9,81 \right), \quad (2.96)$$

где $Q_{\text{сут}}$ — суточный выход навоза, кг/сут; k_{y6} — число включений транспортера для уборки навоза в течение суток; k_n — коэффициент, учитывающий неравномерность накопления навоза в интервалах между уборками и добавочные усилия, связанные с перемещением навоза по каналу, $k_n = 3 \dots 5$; f_1 — коэффициент трения навоза о желоб; L — длина цепи, м; F — усилие, приходящееся на один скребок, Н (для навоза $15 \dots 30$ Н); t_c — шаг скребков, м, $t_c = 0,1 \dots 1,0$; m_T — масса транспортера длиной 1 м, кг/м; f_2 — опытный коэффициент, $f_2 = 0,4 \dots 0,5$.

На рисунках 2.77 и 2.78 показаны электрические схемы установок для уборки навоза.

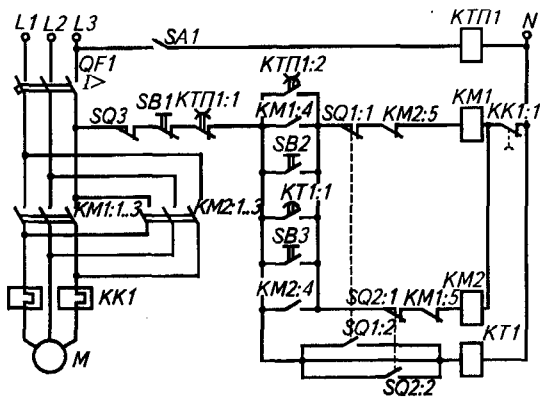


Рис. 2.77. Схема автоматического управления канатно-скреперной установкой для уборки навоза

Установка представляет собой перемещающиеся в навозном канале посредством кольцевого каната скреперы. Для привода установки используют асинхронный электродвигатель с понижающим редуктором.

Схема автоматического управления установкой работает следующим образом. После включения автоматического выключателя $QF1$ и выключателя $SA1$ установка запускается автоматически программным реле времени $KТП1$, а вручную — кнопкой $SB2$. При этом получает питание катушка магнитного пускателя $KM1$, который блок-контактом $KM1:4$ шунтирует кнопку $SB2$ и контакты $KТП1:2$, а контактами $KM1:1...3$ подают напряжение на электродвигатель. Электропривод перемещает один скребок вдоль навозного канала по направлению к выгрузному окну, а другой — по канавке от второго выгрузного окна в исходное положение. Так как скребок при движении назад складывается, то навоз при обратном ходе не сгребается. По достижении первым скребком выгрузного окна срабатывает конечный выключатель $SQ1$, размыкающие контакты которого, размыкаясь, обесточивают катушку $KM1$, и двигатель останавливается, а замыкающие, замыкаясь, подают питание на катушку реле времени $KТ1$.

С выдержкой времени закрывается замыкающий контакт $KТ1:1$. При этом, поскольку размыкающий контакт $SQ1$ открыт, получает питание катушка магнитного пускателя $KM2$, который своими контактами $KM2:1...3$ включает электродвигатель на реверсивный ход, а контактом $KM2:4$ шунтирует контакт $KТ1:1$. В этом случае второй скребок транспортирует навоз ко второму выгрузному окну, по достижении которого срабатывает конечный выключатель $SQ2$, размыкающий контакт которого отключает

электродвигатель, обесточивая катушку $KM2$, а замыкающий подает питание на катушку реле времени $KT1$. По истечении выдержки времени реле $KT1$ закрывает свой контакт и, поскольку размыкающий контакт $SQ2$ открыт, а аналогичный контакт $SQ1$ закрыт, получает питание катушка магнитного пускателя $KM1$. В последующем цикл работы повторяется. Остановка установки происходит автоматически при размыкании контактов $KT1:1$, а вручную — при нажатии кнопки $SB1$. От перегрузки канат защищает конечный выключатель $SQ3$, отключающий в этом случае установку. Контакты $KM1:5$ и $KM2:5$ блокируют пускатели $KM1$ и $KM2$.

На рисунке 2.78, а показан скребковый транспортер кругового движения типа ТСН-160, используемый для уборки навоза из животноводческого помещения, который включает в себя горизонтальный и наклонный транспортеры.

Принцип его работы следующий. Транспортеры выгружают навоз в транспортную тележку 2 в течение определенного времени. Сначала размыкаются контакты $KT1:1$ и отключается горизонтальный транспортер. Затем размыкаются контакты $KT1:2$ и отключается наклонный транспортер. Выдержка времени устанавливается достаточной для полного освобождения транспортеров от навоза.

На рисунке 2.78, б изображена электрическая схема управления транспортером ТСН-160. Переключателем SA выбирают дистанционное (P) или автоматическое (A) управление транспортерами. Кнопками $SB1$ и $SB2$ управляют дистанционно. Нажатием кнопки $SB1$ включают реле времени $KT1$, которое своими контактами

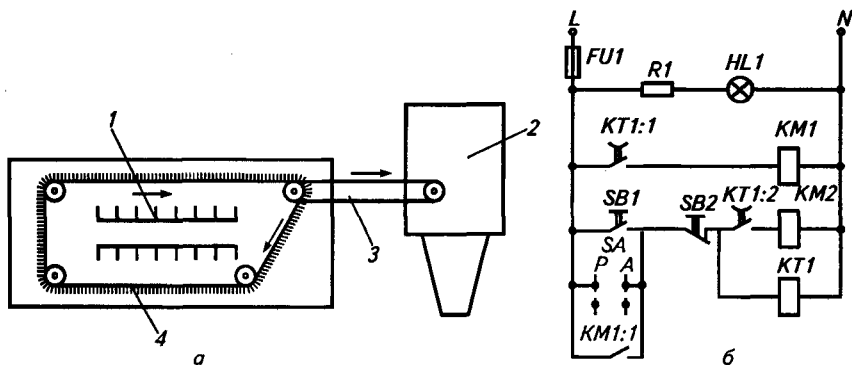


Рис. 2.78. План размещения (а) и схема управления (б) навозоуборочным транспортером:

1 — стойла; 2 — транспортная тележка; 3 — наклонный транспортер; 4 — горизонтальный транспортер

КТ1:2 включает магнитный пускатель *КМ2* электропривода наклонного транспортера, а контактами *КТ1:1* — магнитный пускатель *КМ1* электропривода горизонтального транспортера.

При автоматическом управлении транспортерами переключатель *SA* устанавливается в положение *A*, а реле времени *КТ1* включается в определенное время суток.

Электрооборудование и автоматизация доильных установок и установок первичной обработки молока. Для электроустановок этого типа характерен низкий момент трогания, вентиляторная или близкие к ней механические характеристики, повышенный момент инерции. К ним относят центробежные механизмы: насосы; центробежные и осевые вентиляторы; молочные и другие центрифуги; вакуумные насосы.

Доильный ротационный лопастный вакуум-насос. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП вакуум-насоса

$$P_{\text{д.в.н}} = k_3 \frac{QP_{\text{ост}}}{\eta_{\text{пер}} \eta_{\text{н}}} = k_3 \frac{\frac{1}{\pi} \xi D L z \omega \varphi_{\text{н}} \eta_{\text{м}} \sin \frac{\beta}{2}}{\eta_{\text{пер}} \eta_{\text{н}}} H \cdot 10^{-3}, \quad (2.97)$$

где k_3 — коэффициент запаса; Q — подача вакуум-насоса, м³/с; $P_{\text{ост}}$ — остаточное давление в насосе, Н/м²; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи; $\eta_{\text{н}}$ — КПД насоса (имеет значение примерно 0,2); ξ — эксцентриситет, м; D — диаметр цилиндра корпуса, м; L — длина ротора, м; z — число лопаток; ω — угловая скорость ротора, рад/с; $\varphi_{\text{н}}$ — степень наполнения всасывающей камеры, $\varphi_{\text{н}} = 0,5 \dots 0,8$; $\eta_{\text{м}} = 0,52 \dots 0,32$ — манометрический коэффициент (большие значения соответствуют меньшим значениям остаточного давления); β — угол между лопатками, рад; H — остаточное давление, создаваемое насосом, Па.

Сепаратор. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП сепаратора определяют по средней пусковой мощности барабана сепаратора

$$P_{\text{с}} = \frac{k_1 k_2 J \omega^2}{t \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (2.98)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий наличие пускового механизма типа центробежных фрикционных муфт для облегчения пуска (при прямом соединении $k_1 = 1,0$); k_2 — коэффициент, учитывающий трение барабана о воздух ($k_2 > 1,0$); J — момент инерции барабана относительно его оси вращения, кг·м²; ω — угловая скорость барабана при нормальном режиме, рад/с; $t = 120 \dots 180$ с — время разгона барабана до номинальной скорости, с; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД передачи, $\eta_{\text{пер}} = 0,2 \dots 0,8$.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП сепаратора производительностью 0,1...1 м³/ч может быть определена также из выражения, соответствующего установившемуся режиму сепаратора:

$$P_{\text{с}} = k_3 k_{\text{м}} (M_0 + b \omega) 10^{-3}, \quad (2.99)$$

где k_3 — коэффициент запаса; $k_{\text{м}} = 1,2 \dots 2$ — коэффициент, учитывающий мощ-

ность, которая нужна для сообщения кинетической энергии поступающей в барабан жидкости, преодоления гидродинамических потерь и потерь трения в подшипниках и передаточном механизме; M_0 — начальный момент на валу привода, Н·м; b — коэффициент пропорциональности, зависящий от качества обработки элементов кинематической схемы привода, массы барабана, степени шероховатости поверхности барабана сепаратора, Н·м/(рад/с)², $b = (0,1...1,0)10^{-6}$ (меньшие значения принимают для сепараторов с меньшей производительностью).

Лопастная мешалка танков-охладителей для молока. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП плоской лопастной мешалки определяют по начальному режиму работы

$$P_{л.м} = \frac{c\rho h z \omega^3 (R_n^4 - R_b^4)}{8\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.100)$$

где c — коэффициент, отражающий поправку, обусловленную тем, что вязкая жидкость захватывается не только поверхностью мешалки, но в некоторой мере и связанными с поверхностью частицами ($c > 1,0$); ρ — плотность молока, кг/м³, принимают $\rho = 1030$ кг/м³; h — высота погружной части лопастей, м; z — числа лопастей мешалки; ω — угловая скорость мешалки, рад/с; R_n и R_b — соответственно наружный и внутренний радиусы лопастей, м; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП мешалки

$$P_{л.м} = \frac{\zeta \rho v^2 s}{8\eta_{пер}} 10^{-3}, \quad (2.101)$$

где ζ — коэффициент сопротивления (принимают $\zeta = 0,02...0,2$); v — средняя окружная скорость поверхности трения лопасти мешалки, м/с; s — суммарная площадь поверхности трения, м².

Компрессор-охладитель молока. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП компрессора

$$P_{к.о} = \frac{Q}{k_{кл} \eta_1 \eta_2 \eta_{пер}}, \quad (2.102)$$

где Q — холодильная мощность, кДж/ч; $k_{кл}$ — удельная холодопроизводительность, кДж/(кВт·ч); η_1 — индикаторный КПД компрессора; η_2 — механический КПД компрессора, $\eta_2 = 0,85...0,9$; $\eta_{пер}$ — КПД передачи.

Пастеризатор. Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП парового барабанного пастеризатора

$$P_{п} = \frac{246\rho v^3 S}{\eta_{пер}} 10^{-7}, \quad (2.103)$$

где ρ — плотность молока, кг/м³; v — средняя окружная скорость барабана, м/с; S — площадь рабочей поверхности барабана, м²; $\eta_{пер}$ — КПД передачи, равный 0,7...0,86.

Схема автоматического управления электроприводом сепаратора показана на рисунке 2.79.

При нажатии на кнопку *SB1* при замкнутом переключателе *SA* получает питание обмотка первой скорости электродвигателя и он начинает разгон сепаратора при большом пусковом моменте. При достижении половинной частоты вращения ЭДС тахогенератора *BR* становится равной напряжению срабатывания реле *KL1*, которое контактом *KL1:1* отключает магнитный пускатель *KM1* и обмотку первой скорости, контактом *KL1:2* включает магнитный пускатель *KM2*, подключая обмотку второй скорости электродвигателя. При этом сепаратор продолжает разбег до номинальной частоты вращения. Данная схема позволяет уменьшить пусковые токи, обеспечить больший пусковой момент и тем самым сократить продолжительность пуска.

Охладители молока обычно имеют принципиальную схему, изображенную на рисунке 2.80, которая предусматривает как ручной, так и автоматический режим работы.

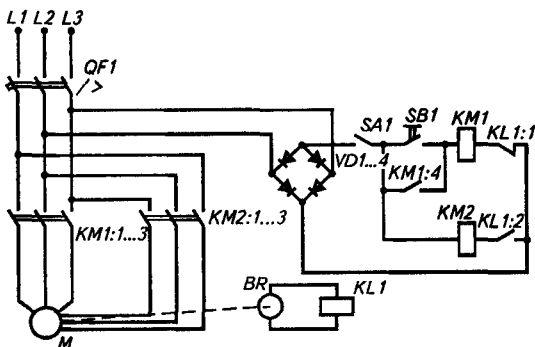


Рис. 2.79. Схема управления электроприводом сепаратора

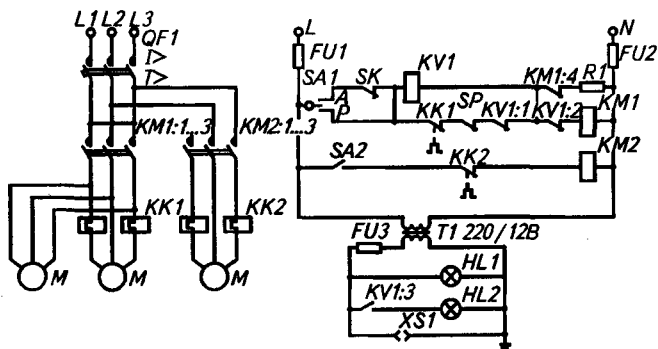


Рис. 2.80. Принципиальная схема управления охладителем молока

При ручном управлении переключатель *SA1* устанавливают в положение *P*. При этом включается катушка магнитного пускателя *KM1* и своими контактами *KM1:1...3* подает питание на электродвигатели вентилятора (*M1*) и компрессора (*M2*). Одновременно контактом *KM1:4* разрывается цепь резистора *R1*.

Электродвигатель насоса (*M3*) включают переключателем *SA2*. При этом магнитный пускатель *KM2* своими контактами *KM2:1...3* подает питание на электродвигатель *M3*. В этом случае холодильный агрегат работает в автоматическом режиме. Если давление на выходе компрессора превысит норму, то разомкнется контакт реле давления *SP* и расшунтирует катушку промежуточного реле защиты *KV1*, которое контактом *KV1:2* отключит магнитный пускатель *KM1*, подающий питание на электродвигатели компрессора и вентилятора агрегата, а контактом *KV1:3* включит сигнальную лампу *HL2*. Чтобы снова включить агрегат вручную, нужно переключатель *SA1* перевести сначала в положение *A*, затем снова в *P*.

В автоматическом режиме переключатель *SA1* устанавливают в положение *A*. В этом случае температуру контролирует терморегулятор *SK*, который своими контактами посредством магнитного пускателя *KM1* включает агрегат при повышении и отключает при понижении температуры.

2.8.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Теплицы подразделяют на *почвенные* и *гидропонные*. В гидропонных теплицах продукцию выращивают на искусственных средах: щебень, керамзит и др. Наибольшее распространение для выращивания овощей получили почвенные теплицы: зимние остекленные и летние пленочные блочного и ангарного типов.

Выращивание овощей в гидропонных теплицах на искусственных субстратах не получили значительного распространения в нашей стране. Хотя за рубежом, в странах с более теплым климатом и менее плодородными почвами, гидропонные теплицы имеют более перспективное применение. В России больше применяют для выращивания овощей системы капельного полива, что позволяет сэкономить значительное количество дорогих удобрений и растворов. По сравнению с технологией выращивания овощей в обычных теплицах способ капельного полива имеет ряд значительных преимуществ: нет необходимости проведения таких трудоемких и энергоемких операций, как обработка всего объема почвы, полив, внесение удобрений. В этих теплицах растения выращивают в специальных секциях, заполненных специальным стерильным грунтом. Для питания их в секции с помощью труб-капельниц периодически подводится специально подготовленный питательный раствор.

Для автоматизации подачи и распределения раствора разработана система программного управления. В ней использованы задвижки с электроприводом от исполнительных механизмов типа ПР-1М. Временную программу подачи раствора реализуют с помощью реле времени типов 2РВМ и ВС-10. Для контроля уровня раствора в секциях используют электродные датчики.

В гидропонных теплицах для автоматического приготовления, подачи и распределения питательных растворов используют несколько типов промышленных установок. Это установки типов АБТ-4, ОБВ-6, БГТ-600, ТГЦ-2000 (табл. 2.12).

2.12. Технические характеристики гидропонных установок

Показатели	АБТ-4	ОБВ-6	БГТ-600	ТГЦ-2000
Площадь обслуживания, м ²	600	3000	600	2000
Число секций	4	6	4	8
Потребляемая мощность, кВт	5	16	3	6
Расход электроэнергии за сутки на 1 м ² , Вт·ч	50	32	20	18

Установки снабжены узлом приготовления раствора, емкостью для его хранения, насосами, элементами распределения. Однако эти узлы имеют различное техническое исполнение. В установке АБТ-4 раствор готовят из концентратов макро- и микроэлементов, необходимых для питания растений, с разбавлением в соотношении 1 : 50. Распределяется раствор по секциям (стеллажам) посредством клапанов с электромагнитным приводом. В установке ОБВ-6 прототипный узел содержит порционные дозаторы и водомер, а вместо распределительных клапанов — барабанный распределитель с гидроприводом. Установки БГТ-600 и ТГЦ-2000 вместо баков для хранения раствора имеют бетонированные траншеи, располагаемые под полом теплиц. Во всех установках технологический процесс приготовления и распределения раствора автоматизирован.

Для автоматического управления облучательными установками рассады в теплицах применяют системы автоматического контроля и регулирования освещенности растений. Они состоят из фотосопротивления, датчика освещенности физиологически активной радиации (ФАР), электронного моста с трехпозиционным регулирующим устройством; облучательной установки, которая может состоять из различных по типу источников искусственного излучения и пускорегулирующих устройств. Действие системы состоит в следующем: при снижении естественной освещенности рассады в теплице относительно заданных значений по сигналу датчика регулирующее устройство моста последовательно включает одну, две, три группы ламп и, наконец, все лампы облучательной установки. Таким образом поддерживают требуемую освещенность рассады.

2.8.4. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ И ПТИЦЕВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ, В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Общие сведения. К сельскохозяйственным помещениям относят помещения для содержания животных, птиц, хранилища сельскохозяйственной продукции, а также помещения защищенного грунта, т. е. теплицы.

Для обеспечения температурно-влажностного режима в вышеперечисленных помещениях в большинстве случаев применяют два вида отопления: водяное и воздушное.

Регулирование микроклимата возможно с помощью энергетических установок и мероприятий, к которым относят рациональную планировку самих помещений, использование строительных материалов с соответствующими теплотехническими свойствами, прогрессивные технологии содержания, кормления, поения и удаления навоза и помета, а также системы отопления и вентиляции.

Различают местные и централизованные системы воздушного отопления. Основные части систем: тепловой центр 1 (рис. 2.81), приточный 2 и вытяжной 3 воздуховоды, трубопровод 4 теплоносителя, теплообменник-утилизатор 5. Тепловой центр представляет собой электрокалорифер или тепловой генератор (бойлер).

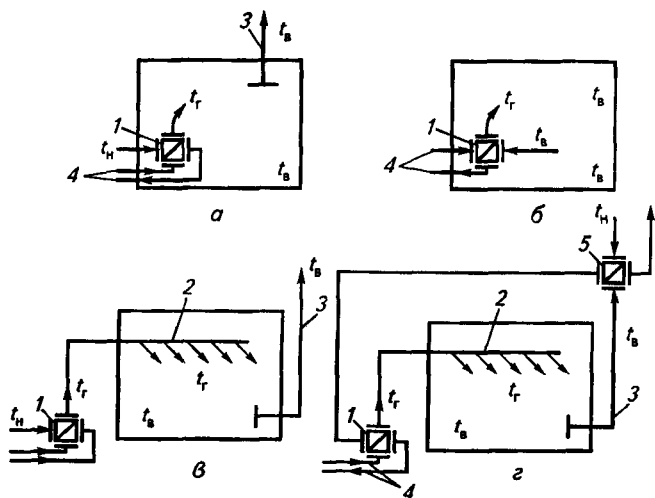


Рис. 2.81. Схемы систем воздушного отопления:

а, б — местные системы; *в, г* — централизованные системы; 1 — тепловой центр; 2, 3 — соответственно приточный и вытяжной воздуховоды; 4 — трубопровод теплоносителя; 5 — теплообменник-утилизатор

В местной (прямоточной) системе (рис. 2.81, а) наружный воздух с температурой t_n подогревается в тепловом центре до требуемой температуры t_r и подается в помещение. Такое же количество воздуха с более высокой температурой t_b удаляется из помещения по вытяжному воздуховоду 3. Если воздух требуется только подогреть без его замены, тогда применяют рециркуляционную систему отопления (рис. 2.81, б) без вытяжного воздуховода.

Централизованные системы имеют большую тепловую мощность. Их размещают в отдельном помещении. С их помощью обогревают несколько помещений. В отличие от местных они имеют приточные воздуховоды 2 и теплообменники 5 (рис. 2.81 в, г).

Из анализа всех представленных систем с точки зрения энергосбережения следует, что наиболее предпочтительна система с recuperацией энергии в теплообменнике (рис. 2.81, г). В нем энергия удаляемого из помещения воздуха частично подогревает наружный воздух перед подачей в тепловой центр 1.

Влажность воздуха также существенно влияет на состояние здоровья и продуктивность животных и птиц. Влажность в помещениях изменяется вследствие жизнедеятельности животных и состояния пола, стен помещения и кормушек. Каждое животное крупного рогатого скота выделяет 7...25 кг воды и влаги в сутки, свинья — до 20 кг. Высокая влажность воздуха отрицательно действует на организм животного как при низких, так и при высоких температурах воздуха. Высокие влажность и температура затрудняют теплоотдачу организма, особенно при малой скорости воздуха. Это вызывает перегревание. При высокой влажности и низкой температуре воздуха животное теряет большое количество теплоты, что вызывает охлаждение и простудные заболевания. При этом ухудшается аппетит животных и снижается их продуктивность, а также уменьшается срок службы оборудования. Чрезмерно низкая влажность воздуха при повышенной температуре усиливает потерю влаги организмом, что вызывает у животного жажду и потливость. В таблице 2.13 приведена наилучшая относительная влажность воздуха в помещениях.

2.13. Наилучшая относительная влажность воздуха в животноводческих помещениях

Животные и птицы	Относительная влажность, %
Крупный рогатый скот	40...85
Свиньи	40...75
Овцы	До 75
Птицы	60...70

Чрезвычайно важен газовый состав воздуха в животноводческих помещениях. Предельно допустимые концентрации газов приведены в таблице 2.14.

2.14. Предельно допустимые концентрации газов в животноводческих помещениях

Животные и птицы	Диоксид углерода, %	Аммиак, мг/л	Сероводород, мг/л
Телята	0,15	0,02	0,005
Крупный рогатый скот	0,25	0,02	0,01
Овцы	0,25	0,02	0,01
Свины	0,20	0,02	0,01
Птицы	0,25	0,015	0,005

Скорость движения воздуха на фермах влияет особенно на молодняк. Большая скорость воздуха вызывает простудные заболевания, а малая затрудняет очистку помещений от влаги, пыли и вредных микроорганизмов. Поэтому установлены следующие скорости движения воздуха: зимой — 0,2...0,4 м/с, летом — 0,5...1,15 м/с.

Производственные шумы выше допустимых норм также отрицательно влияют на животных, птицу и обслуживающий персонал. Допустимая интенсивность шума при низких частотах 90 дБ, а при частотах свыше 1 кГц 70...85 дБ.

Световой режим существенно влияет на все функции организма животного и проявляется в форме светового, теплого и химического воздействий. Солнечный свет оказывает положительные действия на физиологические процессы, в том числе на нервную и половую системы. При «световом» голодании ухудшается состояние организма, снижаются продуктивность, естественная резистентность, половая активность и оплодотворяемость. В зимнее время недостаточную солнечную освещенность компенсируют электрическим светом.

Автоматизированные системы управления температурой и влажностью в сельскохозяйственных помещениях. Их можно осуществлять с помощью представленных ниже приборов.

Реле-регулятор с таймером ТРМ501 предназначен для регулирования температуры, влажности и других физических величин в сельскохозяйственных производствах, где требуется точное соблюдение временных режимов. Функциональные возможности прибора следующие: измерение и регулирование температуры и влажности, подключение первичных преобразователей широкого спектра к универсальному входу, регулирование по двухпозиционному закону, дистанционное управление запуском или остановкой, обратный отсчет времени встроенным таймером, возможность сигнализации аварийного режима. Функциональная схема реле-регулятора ТРМ501 показана на рисунке 2.82.

ТРМ501 имеет один универсальный вход для подключения датчиков следующих типов: термопреобразователей сопротивления ТСМ50/100М и ТСП50/100П; терморезисторы ТХК(Л), ТХА(К), ТНН(Н), ТЖК(Ж); датчиков с унифицированным сигналом тока или напряжения. К дополнительному входу прибора можно подключить устройства с «сухими» контактами (кнопки, выключате-

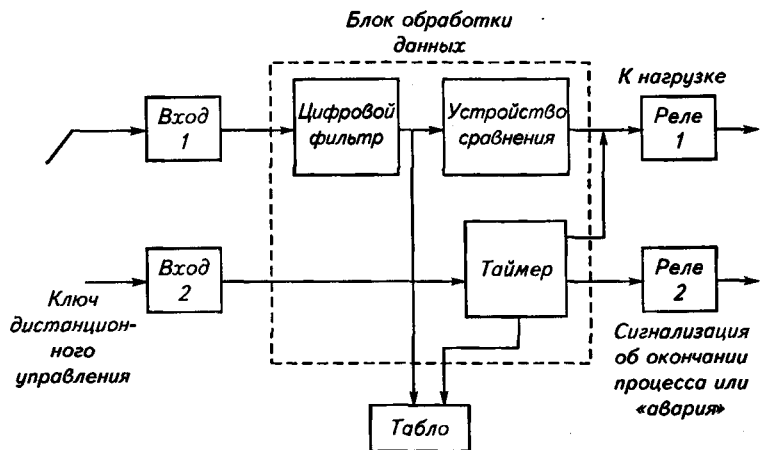


Рис. 2.82. Функциональная схема реле-регулятора TRM501

ли, герконы, реле и др.); активные датчики, имеющие на выходе транзистор *n-p-n* типа с открытым коллекторным выходом; другие типы датчиков с выходным напряжением высокого уровня от 2,4 до 30 В и низкого уровня от 0 до 0,8 В. Входной ток при напряжении низкого уровня не превышает 15 мА.

Блок обработки данных в приборе предназначен для обработки входного сигнала (цифровой фильтрации и коррекции), индикации измеряемой величины и формирования сигналов управления.

В зависимости от заданного типа логики прибор TRM501 регулирует как нагревание, так и охлаждение контролируемой среды.

Таймер данного устройства может работать в следующих режимах.

1. Таймер включен и управляет работой компаратора: процесс регулирования будет запускаться и останавливаться таймером. Выходное реле 2 используют для сигнализации об окончании процесса регулирования.

2. Таймер включен (или выключен), регулирование происходит независимо от таймера. По окончании работы таймера реле 2 замыкается, регулирование продолжается.

3. Ручное управление запуском и установкой процесса регулирования. Таймер при этом включен, уставка таймера 0.

TRM501 имеет два выходных реле с параметрами: 8А, 220 В, жестко закрепленных за таймером и устройством сравнения. Реле 2 таймера сигнализирует о завершении работы таймера или о возникновении аварийного режима.

ПИД-регулятор TRM12. Для автоматизации подачи теплоносителя в системах горячего водоснабжения в хозяйствах защищенного грунта, а также газового и парового отопления и в другом тех-

нологическом оборудовании, где используют запорно-регулирующие или трехходовые клапаны и задвижки с электроприводом, применяют измеритель ПИД-регулятор ТРМ12. Основные функции этого прибора заключаются в управлении электроприводом запорно-регулирующей аппаратуры или трехходовых клапанов, а также в измерении и поддержании температуры или другой физической величины по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону, автоматическом определении коэффициентов ПИД-регулятора.

Функциональная схема прибора показана на рисунке 2.83.

ТРМ12 представляет собой одноканальный трехпозиционный ПИД-регулятор с одним входом для подключения датчика и микропроцессорным блоком обработки данных, формирующим сигналы управления двумя выходными устройствами.

В режиме управления нагревом или охлаждением на выходе ПИД-регулятора вырабатывается сигнал, действие которого направлено на уменьшение отклонения текущего значения контролируемой величины от заданного. Затем выходной сигнал ПИД-регулятора преобразуется в длительность импульсов по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Период следования импульсов задается пользователем в диапазоне от 1...99 с, а их длительность пропорциональна величине выходного сигнала ПИД-регулятора.

На рисунке 2.84 приведена схема подключения электропривода двигателя исполнительного механизма МЭО.

На рисунке 2.84 *КМ1*, *КМ2* — катушки электромагнитных пускателей, которые управляют открытием и закрытием заслонки соответственно.

Данный ПИД-регулятор имеет режим самонастройки, в процессе которого он самостоятельно определяет оптимальные для системы регулирования параметры: постоянную интегрирования, постоянную дифференцирования, полосу пропорциональности. В ТРМ12 установлены два однотипных ключевых выходных устройства ВУ1 и ВУ2. Тип ВУ пользователь выбирает при заказе.

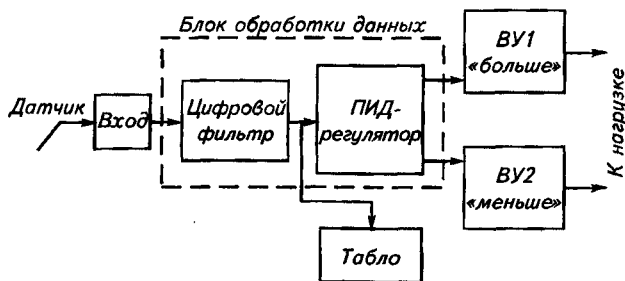


Рис. 2.83. Функциональная схема прибора ТРМ12

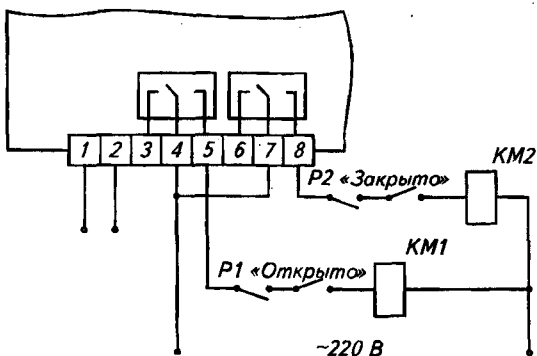


Рис. 2.84. Пример подключения управляющих цепей электропривода двигателя МЭО

Структура условного обозначения ПИД-регулятора ТРМ12 показана на рисунке 2.85.

Электрокалориферные установки. Их используют в основном в системах приточной вентиляции на животноводческих фермах и комплексах.

На рисунке 2.86 представлена принципиальная электрическая схема управления электрокалориферной установки типа СФОЦ.

Установка работает следующим образом. Нагревательные элементы разбиты на три секции, которыми управляют позиционные регуляторы *A1* и *A2*. Температуру воздуха в помещении поддерживают вручную и автоматически. Переключателем *SA* задают мощность калорифера в соответствии с режимной картой установки.

При снижении температуры ниже нормы, если установка работает в автоматическом режиме, термореле *SK* включает магнитный пускатель *KM4* электродвигателя *M* вентилятора и через контакты термореле напряжение подается в схему управления. В этом случае через замкнутые контакты терморегулятора *A1* включается первая секция *ТЭН*. Если температура воздуха, проходящего через нагревательные элементы, ниже нормы, то терморегуляторы *A1* и *A2* поочередно включают *II* и *III* секции нагревателей магнитными пускателями *KM2* и *KM3* соответственно.

Установки СФОА и СФОЦ мощностью 16...100 кВт состоят из электрокалорифера типа СФО с трубчатыми электронагревателями, соединенного переходным патрубком и мягкой вставкой с центробежным вентилятором Ц4-70 и односкоростным электродвигателем. Все оборудование, включая электрокалорифер, смонтировано на общей раме. В комплект входит также щит автоматического управления.

Вентиляторы низкого и среднего давления, центробежные общего назначения, осевые и крышные. Их применяют в системах микро-

TRM12X-X-X-X

Тип корпуса:

Щ1 — щитовой, 96×96×70 мм, IP54;

Щ2 — щитовой, 96×48×100 мм, IP20;

Н — настенный, 130×105×65 мм, IP 44

Тип входа:

ТС* — для подключения датчиков типа ТСМ/ТСП;

ТП1 — для подключения термопар ТХК, ТХА;

ТП2 — для подключения термопар ТНН, ТЖК;

ТПП(S) — для подключения термопар ТПП(S);

ТПП(R) — для подключения термопар ТПП(R);

АТ — для подключения датчиков с унифицированным выходным сигналом тока;

АН — для подключения датчиков с унифицированным сигналом напряжения

*Класс точности 0,25 для модификации входа ТС следует указывать после обозначения

Выходы:

Р — два электромагнитных реле 1А и 8А 220В;

К — две транзисторных оптопары п-р-п типа 200мА 50В;

С — две симисторных оптопары 50 мА 300 В для управления однофазной нагрузкой

Рис. 2.85. Структура условного обозначения TRM12

климата животноводческих помещений. Центробежные вентиляторы общего назначения Ц4-70 предназначены для приточных вентиляционно-отопительных установок и вытяжных систем. Они способны развивать высокое давление — до 4000 Н/м². На одной оси с электродвигателем в специальном кожухе расположено лопастное рабочее колесо, при вращении которого воздух, поступающий через входное отверстие, попадает в каналы между направленными лопатками, а затем в выпускные отверстия.

Контроллер для регулирования температуры TRM32-Щ4. Его применяют для регулирования температуры в контуре отопления, горячего водоснабжения для водяных калориферов, защиты системы от превышения температуры обратной воды, записи данных на компьютер.

Этот прибор представляет собой двухканальный ПИД-регулятор с четырьмя входами, к которым подключены термопреобразователи сопротивления, блок обработки данных и четыре выходных устройства (реле). Структурная схема прибора показана на рисунке 2.87.

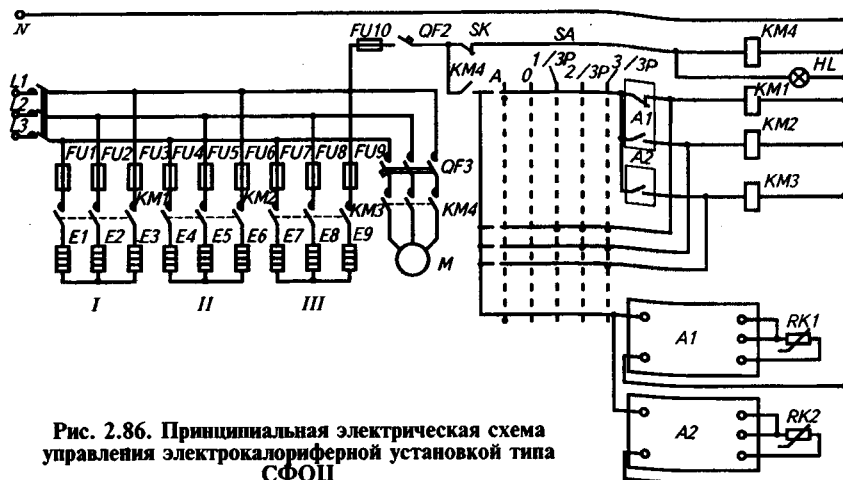


Рис. 2.86. Принципиальная электрическая схема управления электрокалориферной установкой типа СФОЦ

Ко входам подключены датчики ТСМ 50М, ТСП 50П или ТСМ 100М, ТСП 100П, которые контролируют: температуру наружного воздуха; температуру обратной воды, возвращаемой в теплосеть; температуру воды в контуре отопления; температуру воды в контуре горячего водоснабжения.

В случае превышения максимально допустимого значения, ТРМ32-Щ4 прерывает регулирование температуры в контуре отопления и понижает температуру обратной воды до заданного значения. После снижения температуры обратной воды до допустимых пределов продолжается регулирование температуры в контуре отопления по отопительному графику.

Прибор ТРМ33-Щ4. Он представляет собой также ПИД-регулятор с двумя группами входных датчиков. Структурная схема прибора приведена на рисунке 2.88.

По результатам измерений температур и опроса входных датчиков ТРМ33-Щ4 управляет работой вентилятора и жалюзи, а также положением запорно-регулирующего клапана (КЗР) для поддержания заданной температуры в системе отопления. Перед началом работы ТРМ33 прогревает калорифер. Время прогрева определяет пользователь исходя из эксплуатационных параметров системы. Для более быстрого разогрева прибор формирует команду на выключение вентилятора, закрытие жалюзи и полное открытие КЗР.

Температура приточного воздуха в системе задается пользователем при программировании прибора. Приточный воздух нагревается теплоносителем, проходящим через калорифер. ТРМ33-Щ4 по температуре уставки с помощью выходных реле управляет жалюзи и вентилятором, полающими приточный воздух, а также по-

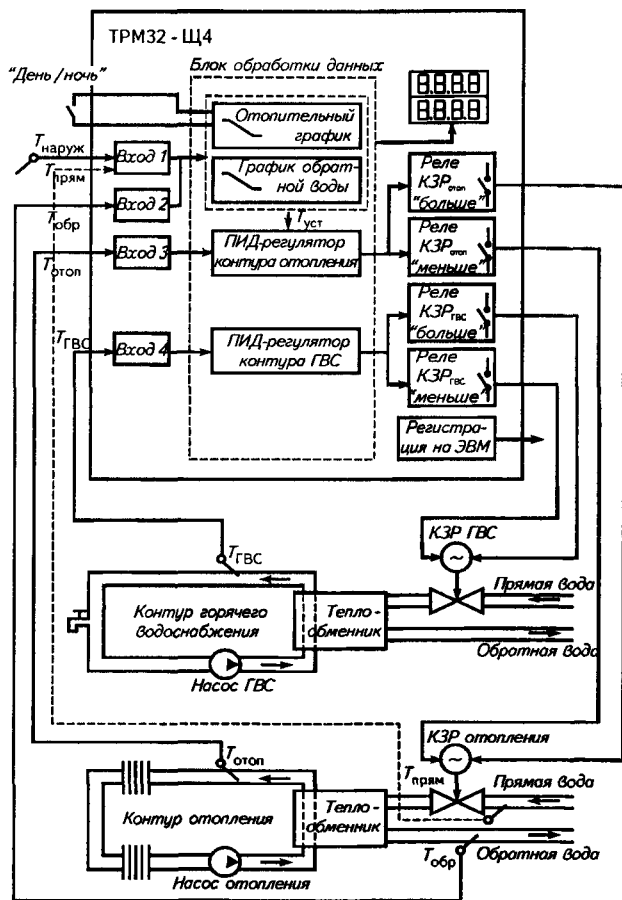


Рис. 2.87. Структурная схема регулятора ТРМ32-Щ4

ложением КЗР, подающим теплоноситель в калорифер. Управление КЗР осуществляется кратковременными импульсами по ПИД-закону регулирования, что позволяет поддерживать заданную температуру с высокой точностью.

Вентиляция сельскохозяйственных объектов необходима для обеспечения оптимальных значений температуры, относительной влажности воздуха, а также поддержания должного его состава, т. е. удаление из помещений выделяемых животными вредных газов.

В качестве привода вентиляторов в калориферных установках используют асинхронные электродвигатели серии АИР, 5А, 6А и

другие модификации. Исполнение двигателей должно быть закрытое, узлы и детали защищены от коррозии гальваническими и лакокрасочными покрытиями.

Мощность нагрузки, кВт, на валу ЭП вентилятора при постоянной плотности воздуха

$$P_B = k_3 \frac{P_B Q \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{общ}}}, \quad (2.104)$$

где k_3 — коэффициент запаса, для осевых вентиляторов $k_3 = 1,05 \dots 1,10$, для центробежных $1,10 \dots 1,15$; P_B — давление вентилятора, Па; Q — подача вентилятора, м³/с; $\eta_{\text{общ}}$ — общий КПД вентиляторной установки.

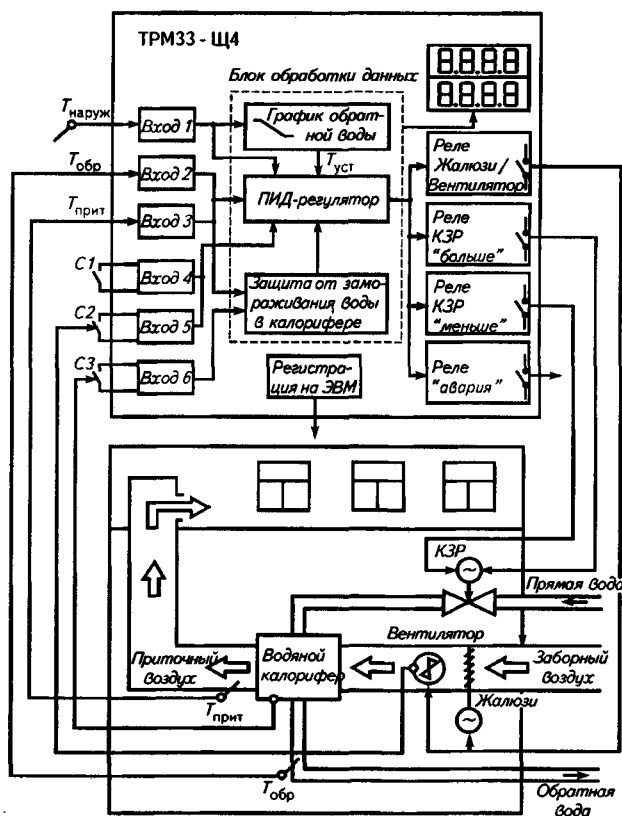


Рис. 2.88. Структурная схема прибора ТРМ33-Щ4

Наиболее эффективное с точки зрения энергосбережения техническое решение вопроса сокращения расхода электрической и тепловой энергии на обеспечение необходимого микроклимата — это использование теплоты воздуха, удаляемого из животноводческих помещений.

Теплогенераторы и устройства местного обогрева. Их применяют наряду с вышеперечисленным оборудованием для обогрева. На рисунке 2.89 приведена схема управления теплогенератором.

Теплогенератор работает в четырех режимах управления, которые выбирают переключателем *SA1*: 1 — продувка, пуск, ручной режим; 2 — ручное отопление; 3 — автоматическое отопление; 4 — отключено.

В режиме «Ручное отопление» теплогенератор включается в работу переключателем *SA1* установкой его в положение 1. Через контакты переключателя *SA1* и размыкающий контакт *SK3* проходит ток и включает пускатель *KM2* электродвигателя *M2* вентилятора форсунки. Начинается продувка камеры сгорания.

После выдержки времени (обычно 20...30 с) оператор нажимает кнопку *SB1* и подает напряжение на первичную обмотку высоко-

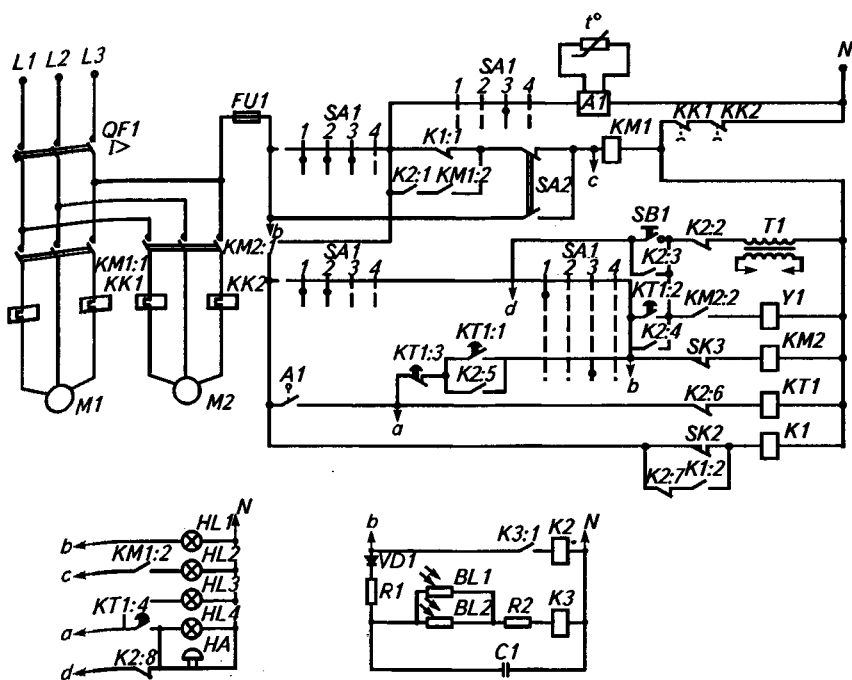


Рис. 2.89. Принципиальная электрическая схема управления теплогенератором

вольтного трансформатора *T* и одновременно на электромагнитный клапан *У* подачи топлива. Смесь топлива и воздуха воспламеняется, и этот процесс фиксируется реле контроля пламени, которое выполнено посредством двух фоторезисторов: *BL1* и *BL2*. Включившиеся реле *K2* своими контактами *K2:2* и *K2:3* разрывают цепь трансформатора зажигания и блокируют кнопку *SB1* цепи питания пускателя *KM2* вентилятора горелки и электромагнитного клапана *У*. Далее переключатель *SA1* переводят в положение 2.

Термореле *SK2* контролирует прогрев камеры сгорания в цепи реле *K1*. При этом реле *K1* блокирует при пуске контактами *K1:1* включение магнитного пускателя *KM1*. По окончании прогрева камеры сгорания и размыкания *SK2* тумблером *SA2* включают магнитный пускатель электродвигателя *M1* основного вентилятора *KM1*, который подает в помещение свежий подогретый воздух.

Для отключения теплогенератора переключатель *SA1* переводят в положение 4 «Отключено», что приводит к закрытию клапана *У*, прекращается подача топлива, гаснет факел и отключается вентилятор горелки. После остывания камеры сгорания тумблером *SA2* останавливают основной вентилятор.

Режим управления «Автоматическое отопление» устанавливают переключателем *SA1* в положение 3. Это вызывает включение реле *K1*, размыкающий контакт которого в цепи *KM1* блокирует включение основного вентилятора и подачу в помещение холодного воздуха. В это же время подается напряжение питания на трехпозиционный терморегулятор *A1*. Когда температура в помещении ниже заданной нормы, замыкаются контакты терморегулятора *A1* и включается реле времени *KT1*, которое обеспечивает программу пуска теплогенератора. Через 6 с по размыкающему контакту *KT1:3* и замыкающему контакту *KT1:1* включается магнитный пускатель *KM2* двигателя вентилятора горелки и начинается продувка камеры сгорания. Через 20 с замыкается контакт *KT1:2* и напряжение подается на катушку электромагнитного клапана *У1* и трансформатора зажигания *T1*. При срабатывании трансформатора топливо воспламеняется.

Сопротивление фоторезисторов *BL1* и *BL2* снижается при появлении пламени в горелке. Далее срабатывают реле контроля пламени *K3* и *K2*. Реле *K2* своими контактами *K2:2* и *K2:6* отключает реле времени *KT1* и трансформатор зажигания *T1*, а контактами *K2:5* и *K2:4* блокирует контакты *KT1:1* и *KT1:2* реле времени *KT1*, сохраняя при этом цепь питания магнитного пускателя *KM2* и двигателя *M2*, вентилятора горелки и электромагнитного клапана подачи топлива.

Термореле *SK2* контролирует прогрев камеры сгорания. В момент достижения температуры значения 40 °С отключается реле *K1* и размыкающим контактом *K1:1* подает напряжение на катушку магнитного пускателя *KM1*. Этим включается в работу основной вентилятор, и теплый воздух подается в обогреваемое поме-

щение. Со временем значение температуры в помещении возрастает и при достижении значения, которое соответствует настройке терморегулятора *A1*, контакты *A1* размыкаются, разрывая цепь питания пускателя горелки *KM2*, электромагнитного клапана *У* и реле времени *KT1*. Пламя факела в камере сгорания потухает, реле времени возвращается в исходное положение. Главный вентилятор продолжает работать и отключается только в случае снижения температуры в камере сгорания до минимального значения. В этом случае замкнутся также контакты реле *SK2*. Алгоритм работы теплогенератора повторится.

Включение сигнальных ламп *HL1*, *HL2*, *HL3* соответственно говорит о наличии питающего напряжения, работе основного вентилятора и срабатывании терморегулятора *A1*.

В схеме управления предусмотрена защита оборудования при некоторых нарушениях в его работе. Например, если при пуске теплогенератора факел не появился сразу, то попытка его розжига продолжается до момента размыкания контактов *KT1:2* и *KT1:4* реле времени. Контакты *KT1:2* отключают подачу топлива, питание трансформатора зажигания и электромагнитного клапана, *KT1:4* включает сигнальную лампу *HL1:4* и сирену *HA*.

После устранения неисправности вторичный пуск генератора выполняют вручную, переводя переключатель *SA1* в положение «Автоматическое отопление».

В случае погасания факела во время работы теплогенератора катушки реле *K2* и *K3* обесточиваются. При этом реле *K2* контактом *K2:2* снова включает трансформатор зажигания и реле времени. В случае неудачной вторичной попытки розжига теплогенератора установка отключается с подачей светозвукового сигнала.

В случае перегрева теплообменника, например при отключении вентилятора, термореле *SK3* обесточит магнитный пускатель *KM2*, основные контакты которого отключат электродвигатель вентилятора горелки, а вспомогательный контакт *KM2:2* — электромагнитный клапан подачи воздуха. Включается сигнал «Авария». Повторно в работу теплогенератор включает обслуживающий персонал.

Электронагревательные установки с устройствами инфракрасного обогрева. Для интенсивного производства молодняка животных и птиц необходимо обеспечить параметры микроклимата в определенных точках животноводческого помещения с особой точностью. Этого достигают, применяя электронагревательные установки в комбинации с устройствами инфракрасного обогрева. Такие установки используют для выращивания молодняка птиц и поросят-сосунов.

Схема управления установкой ЭИС-11И1 «Комби» приведена на рисунке 2.90.

Тумблеры *SA1* и *SA2* задают режимы работы установки: *P* — ручной, *A* — автоматический. В ручном режиме кнопками *SB3* и

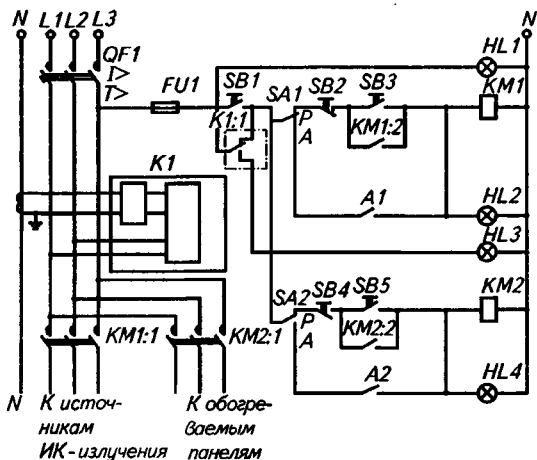


Рис. 2.90. Принципиальная электрическая схема управления установкой для местного обогрева молодняка животных

SB5 включают обогреватели через магнитные пускатели *KM1* и *KM2*. Эти же пускатели в автоматическом режиме включаются или отключаются по команде терморегуляторов *A1* и *A2*, контролирующих соответственно температуру на поверхности электрообогреваемой панели и на установленной поверхности для восприятия теплового потока ИК-излучения. В этом случае оба нагревателя работают независимо друг от друга. Реле тока *K1* контактами *K1:1* отключает установку при нарушении изоляции.

2.8.5. УПРАВЛЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЕМ ПТИЧНИКОВ

Продуктивность кур-несушек всех видов зависит от режима освещения. Режим освещения в птицеводческих помещениях «возрастающий или убывающий день» оказывает стимулирующее влияние. Режимы освещения птичников по специальным программам, корректирующим долготу светового дня, значительно повышают яйценоскость птиц. В целях реализации этих программ птичники строят без окон и оборудуют искусственным электрическим освещением. Для управления освещением применяют различные автоматические программные устройства.

Программные устройства позволяют управлять длительностью светового дня от 6 до 24 ч, имитировать «рассвет» и «закат» естественной освещенности в течение 2...8 мин в соответствии с естественной долготой. Лампы высокого давления для

имитации рассвета в птичниках не нашли широкого применения из-за пульсации излучения, которая приводит к утомляемости птиц.

Для этой же цели разработано программное устройство «Каштан» на базе микропроцессорных элементов, рассчитанное на управление световым режимом в 50 птичниках. Контроллер устройства реализует две программы: контроль светового режима и управление им. Обе программы хранятся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ).

Оператор с клавиатуры дисплея вводит в соответствующий сектор оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) начальную информацию по каждому птичнику: номер стандартного возрастного интервала в технологическом цикле, число суток и начальное приращение (убывание) светового дня в пределах стандартного возрастного интервала. Вся остальная информация для основной породы цыплят хранится в ПЗУ, для других пород может быть введена в ОЗУ. В соответствующие моменты времени микропроцессорная система через коммутатор параллельного интерфейса выдает номер контролируемого объекта, коды команды управления. По этим сигналам в модулях устройств связи с объектом вырабатываются команды включения-отключения систем освещения в птичниках.

2.8.6. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНО- СУШИЛЬНЫХ ПУНКТОВ И КОМПЛЕКСОВ

Поточная линия — это система рабочих машин, механизмов и аппаратов, выполняющая один законченный технологический или производственный цикл, который характеризуется поточностью, непрерывностью и ритмичностью рабочего процесса, что выдвигает определенные требования к автоматизированному электроприводу и технике безопасности.

Схемы автоматического управления поточными линиями должны отвечать следующим требованиям.

Для безопасности обслуживающего персонала пуску автоматизированного электропривода поточной линии должен предшествовать предупредительный звуковой или световой сигнал.

Электродвигатели всех машин и механизмов поточной линии включают в последовательности, направленной против движения продукта (зерна, дерти, сена, корнеклубнеплодов и т. п.), а останавливают в последовательности, совпадающей с направлением движения продукта.

Для остановки всей поточной линии необходимо сначала остановить головной механизм, обеспечивающий прекращение пода-

чи продукта на поточную линию (закрыть заслонку, шибер, затвор), затем с выдержкой времени — все машины, полностью освободившиеся от продукта.

При аварийном отключении одной из машин должны остановиться без выдержки времени все машины, работающие на ее загрузку, а с выдержкой времени, необходимой для полного освобождения от продукта, — все машины, действующие на отгрузку.

Схемы должны обеспечивать невозможность неправильного включения и отключения электрических цепей.

Для устойчивой работы электропривода, а также во избежание недопустимых снижений напряжения схемы последовательного (каскадного) включения электроприводов рассчитывают на предельно допустимую мощность одновременно включаемых электродвигателей.

В целях защиты от перегрузок в схемах предусматривают тепловые реле, размыкающие контакты которых устанавливают в цепь каждой катушки магнитного пускателя. При их последовательном включении в общую цепь питания катушек не обеспечивается должная последовательность остановки электропривода при перегрузках.

Для защиты двигателя от холостого хода при обрыве передаточного ремня на приводной вал рабочей машины устанавливают реле контроля скорости, которое в случае обрыва ремня подает сигнал на остановку поточной линии.

Схемы управления должны быть простыми и надежными. В них рекомендуется применять однотипные средства автоматизации с наименьшим числом элементов, входящих в систему. Надежность установки повышается, если выполнены необходимые электрические и механические блокировки.

Схемы управления должны обеспечивать достаточную гибкость и удобство управления. Систему управления считают гибкой, если она допускает простые и быстрые переходы к управлению во всех предусмотренных режимах. Управление более удобно, если его можно осуществлять с нескольких мест, а также если обеспечен контроль при помощи световой и звуковой сигнализации.

В схемах должны быть предусмотрены кнопки аварийного отключения линии в разных местах протяженного помещения, позволяющие быстро отключить линию.

Электрические схемы управления и блокировок составляют таким образом, чтобы обеспечить контроль исправности системы и максимально упростить процесс нахождения поврежденных. Для этого сложные электрические схемы разбивают на отдельные секции и питают через свои предохранители и выключатели. В схемах используют световую сигнализацию состояния (в работе, вне работы) машин и аппаратов, появления или исчезновения напряжения на отдельных участках схемы.

2.8.7. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ХОЛОДНОГО И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Учет расхода воды в системах холодного водоснабжения. Учет в сфере питьевого водопотребления проводят предприятия питьевого водоснабжения и потребители с помощью технических средств, которые внесены в государственный реестр средств измерительной техники. В случае отсутствия таких технических средств питьевую воду временно с разрешения водоканала учитывают расчетным путем по установленным нормам.

Счетчики воды предназначены для измерения объема сетевой и питьевой воды, протекающей в подающих или обратных трубопроводах закрытых и открытых систем теплоснабжения, системах холодного и горячего водоснабжения в диапазоне температур 5...90 °С при давлении не более 1,0 МПа. Действие крыльчатых счетчиков основано на измерении числа оборотов крыльчатки, вращающейся со скоростью, пропорциональной расходу воды, протекающей в трубопроводе. Конструктивно счетчики выполнены по схеме «сухохода», когда в воде находится только вращающаяся крыльчатка. Кинематическая связь между крыльчаткой и счетным механизмом осуществляется путем магнитного взаимодействия через герметичную перегородку. Опорные части крыльчатки и счетного механизма оснащены часовыми камнями, что обеспечивает длительный срок эксплуатации и высокую надежность прибора.

Принцип работы прибора для измерения объема протекшей воды в трубопроводах больших диаметров такой же, а именно: протекающая вода действует на турбинку, ее вращение через магнитную муфту передается счетному механизму, по показаниям которого определяют объем воды, прошедшей через счетчик.

Для учета расхода воды в котельных применяют дроссельные расходомеры. Измерение расхода с помощью дроссельных расходомеров основано на сужении потока среды, движущейся по трубопроводу. Это приводит к возрастанию его средней скорости, к увеличению кинетической и уменьшению потенциальной энергии. Перепад давления до и после сужающего устройства зависит от расхода проходящей среды: чем больше перепад, тем больше расход.

Наиболее распространенные суживающие устройства, используемые при измерении расходов, — *диафрагмы*.

Различают диафрагмы *камерные* и *бескамерные*. Их диски из нержавеющей стали толщиной 3...6 мм имеют конусное отверстие под углом 30°, направленное суженной частью навстречу потоку. Диафрагмы зажимают болтами между фланцами трубопровода. Трубки, получающие импульс давления от диафрагмы, изготавливают из бесшовных стальных трубок с внутренним диаметром 8...10 мм. В непосредственной близости от диафрагмы устанавли-

вают игольчатые клапаны, которые отключают трубопровод от соединительных линий на случай ремонта вторичного прибора.

Перепад давления на диафрагме измеряют показывающими и самопишущими *дифманометрами-расходомерами*, шкала которых проградуирована в единицах расхода.

Элементы перекачивающей системы. Без насосного оборудования нельзя обойтись также и при выполнении задач, связанных с водоснабжением зданий и удалением из них канализационных стоков. Прежде всего необходимо назвать следующее электрооборудование и насосные установки:

установки для повышения давления, используемые в том случае, если давление в системе водоснабжения недостаточно для водоснабжения большого здания;

циркуляционные насосы для систем ГВС, обеспечивающие наличие горячей воды в любое время в любом месте забора;

откачивающие насосы для грязной воды, использование которых необходимо в том случае, если сточные воды или воды, содержащие фекалии, скапливаются ниже уровня обратного подпора;

другие специальные насосы и электрооборудование, используемое в домашних хозяйствах и промышленности, а также для целей пожаротушения.

На рисунке 2.91 схематически представлены элементы перекачивающей системы, назначение которой — перекачивать жидкость из емкости 4, расположенной на более низком уровне, в емкость 5, расположенную на более высоком уровне. Насос 3 всасывает воду из нижней емкости и подает ее под давлением на необходимую высоту.

Для выбора насоса и определения его мощности по водопотреблению находят требуемую подачу и напор.

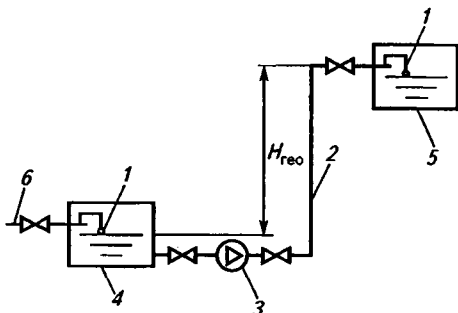
Подача насоса, м³/ч,

$$Q_n \geq Q_{\max \text{ ч}} = \frac{k_{\text{ч}} k_{\text{сут}} Q_{\text{ср.сут}}}{24 \eta_{\text{н}} \cdot 3600}, \quad (2.105)$$

где $Q_{\max \text{ ч}}$ — возможный максимальный часовой расход воды, м³/с; $k_{\text{ч}}$ — коэффициент неравномерности часового расхода, может принимать различные значения: для населенного пункта 1,5...2,5; для ферм с автопо-

Рис. 2.91. Функциональная схема насосной установки:

1 — поплавковый клапан; 2 — нагнетательный трубопровод; 3 — насос; 4 — емкость, из которой перекачивается жидкость на нижнем уровне; 5 — емкость на более высоком уровне; 6 — питающая линия; $H_{\text{гес}}$ — геодезическая высота



илками 2...3; для ферм без автопоилок 4...5; $k_{\text{сут}}$ — коэффициент неравномерности суточного расхода принимают $k_{\text{сут}} = 1,1 \dots 1,3$; η_v — КПД установки, обычно равен 0,9; $Q_{\text{ср.сут}}$ — среднесуточный расход воды, м³/сут,

$$Q_{\text{ср.сут}} = \sum_{i=1}^k q_i n_i \quad (2.106)$$

Здесь q_i — норма воды на одного i -го потребителя, например животное, птицу, техпроцесс, выбирают по справочнику; n_i — число потребителей воды; k — число видов потребителей.

По существующим требованиям в расчете водоснабжения учитывают пожарный расход воды 2,5...10 л/с в зависимости от размеров объекта водоснабжения. Длительность пожаротушения водой принимают равной 2...3 ч. Для обеспечения необходимого расхода воды используют насос и водопроводную сеть или рассчитывают дополнительную емкость.

Напор, м, обеспечиваемый насосом;

$$H_n \geq H_r + H_{\text{п}} + H_{\text{св}}, \quad (2.107)$$

где H_r — геодезический напор, т. е. высота подъема воды от нижнего до верхнего уровня, м; $H_{\text{п}}$ — потери напора во всасывающем и напорном трубопроводах, м; $H_{\text{св}}$ — свободный напор на истечение воды, м.

По напору и подаче в каталоге выбирают насос. При этом учитывают тип насосной установки. Далее рассчитывают мощность нагрузки на валу ЭП насоса

$$P_{\text{лв}} = 9,81 \frac{k_3 \gamma Q_n H_n}{\eta_n \eta_{\text{пер}}}, \quad (2.108)$$

где k_3 — коэффициент запаса, зависящий от мощности, принимают $k_3 = 1,05 \dots 2,0$; η_n — КПД насоса; $\eta_{\text{пер}}$ — КПД механической передачи.

С учетом условий монтажа и окружающей среды, потребной мощности и частоты вращения ЭП насоса выбирают по справочнику соответствующий тип электродвигателя. При этом особое внимание уделяют угловой скорости ЭП насоса, так как подача, напор, момент и мощность находятся в следующей пропорциональной зависимости от нее

$$Q \sim \omega; H \sim \omega^2; M \sim \omega^2; P \sim \omega^3. \quad (2.109)$$

Режим работы электропривода водоснабжающей установки зависит от подачи насоса Q_n , расхода воды в системе водоснабжения Q_p и рабочей регулируемой вместимости бака V_p .

Продолжительность включения

$$t_{\text{в}} = V_{\text{р}} / (Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}}). \quad (2.110)$$

Продолжительность отключения в работе агрегата

$$t_{\text{о}} = V_{\text{р}} / Q_{\text{р}}. \quad (2.111)$$

Длительность цикла

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{в}} + t_{\text{о}} = \frac{Q_{\text{н}} V_{\text{р}}}{Q_{\text{н}} Q_{\text{р}} - Q_{\text{р}}^2}. \quad (2.112)$$

Частота включения двигателя

$$Z = \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{Q_{\text{р}} (Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}})}{Q_{\text{н}} V_{\text{р}}}. \quad (2.113)$$

Расход воды при максимальной частоте включения двигателя

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{н}} / 2. \quad (2.114)$$

Относительная продолжительность включения насосного агрегата

$$\epsilon = \frac{t_{\text{в}}}{T_{\text{ц}}} = \frac{V_{\text{р}} (Q_{\text{н}} Q_{\text{р}} - Q_{\text{р}}^2)}{(Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}}) Q_{\text{н}} V_{\text{р}}}. \quad (2.115)$$

При расходе воды потребителями, который равен 1/2 номинальной подачи насоса, и относительной продолжительности включения $\epsilon = 0,5$ происходит максимальное число включений насосного агрегата. С учетом формул (2.111) и (2.115) получим

$$Z_{\text{max}} = \frac{(Q_{\text{н}}^2 / 2) - (Q_{\text{н}}^2 / 4)}{Q_{\text{н}} V_{\text{р}}} = \frac{Q_{\text{н}}}{4 V_{\text{р}}}. \quad (2.116)$$

На основании этого выражения можно определить рабочую вместимость бака аккумулярующей емкости башенного типа:

$$V_{\text{р}} = Q_{\text{н}} / (4 Z_{\text{max}}). \quad (2.117)$$

Из приведенного ранее следует, что нормальный режим работы

электропривода насосной установки определяется отношением подачи насоса к рабочей вместимости регулирующей емкости.

Уменьшение рабочей вместимости бака приводит к частым включениям. Уменьшение числа включений продлевает срок службы электродвигателя.

На рисунке 2.92 показаны технологическая и принципиальная электрическая схемы водоподъемной установки типа ВУ безбащенного типа. Установка оснащена гидропневматическим аккумулятором и предназначена для подъема воды из открытых водоемов и неглубоких шахтных колодцев глубиной до 5 м при напоре 25...80 м. Установка состоит из всасывающей трубы 1 с приемным фильтром насосного агрегата 2, нагнетательного водопровода 3, водоразборного трубопровода 12 с запирающим вентилем 5, воздушно-водяного бака 4, в котором установлен датчик давления 8, струйного регулятора запаса воздуха, в котором имеется камера смешивания воздуха 6, воздушный клапан 7, жиклер 10 и диффузор 11.

В автоматическом режиме работы схемы управления вода к потребителю поступает под давлением воздушной подушки, которая расположена над водой в котле. При разборе воды из котла давление в котле снижается и замыкаются контакты датчика давления ВР манометрического типа. При этом катушка магнитного пускателя КМ1 попадает под напряжение и включает электрический насос. Если повышается уровень воды в котле, то, следовательно,

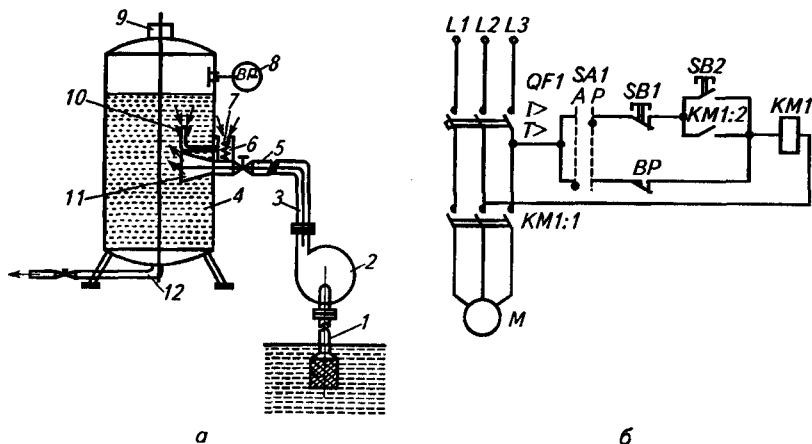


Рис. 2.92. Технологическая (а) и принципиальная (б) схемы управления водоподъемной установки типа ВУ:

1 — всасывающая труба; 2 — насос; 3, 12 — трубопроводы; 4 — бак; 5 — вентили; 6 — камера; 7 — воздушный клапан; 8 — датчик давления; 9 — предохранительный клапан; 10 — жиклер; 11 — диффузор

давление в котле увеличивается до установленного значения, при котором контакты датчика давления *BP* размыкаются и насос отключается.

В ручном режиме работой насоса управляют кнопками *SB2* («Пуск») и *SB1* («Стоп»).

Так как часть воздуха растворяется водой, а затем ею и выносятся, то объем воздушной подушки в баке постоянно уменьшается, следовательно, снижаются давление воздушной подушки и регулирующий объем воды в котле и установка начинает включаться в работу.

Струйный регулятор предназначен для автоматического поддержания объема воздушной подушки. С помощью струйного регулятора обеспечивают подкачку воздуха до давления в баке 250 кПа. В случае, когда давление достигнет максимального аварийного значения, должен сработать предохранительный клапан 9. Пополнение воздуха происходит, когда жиклер 10 перекрыт водой. Струя воды, подаваемая насосом 2, создает разрежение в камере 6, воздушный клапан 7 открывается, и смесь воды и воздуха поступает в котел.

Безбашенные водокачки имеют недостатки: низкий коэффициент использования бака, большой перепад напора, взрывоопасность. Ввиду этого их применение ограничено.

Водокачки Рожновского башенного типа с погружным электронасосом (рис. 2.93) лишены подобных недостатков, поэтому их широко применяют в сельском хозяйстве.

Погружные электронасосы типа ЭЦВ имеют подачу до 1000 м³/ч при напоре 12...680 м. Предназначенный для работы в воде электродвигатель 1 (рис. 2.93, а) в монолите с многоступенчатым насосом 2 закрепляют на водоподъемных трубах 3 и помещают в скважину 5. К плите 7, установленной в помещении 11, крепят трубы. Из обсадных труб диаметром 100...450 мм выполняют скважины. Электродвигатели в таких установках применяют следующих исполнений: сухими, полусухими, заполненными водой или маслом.

Бак 12 водонапорной башни выполняют сварным из листовой стали и устанавливают на железобетонную, кирпичную или металлическую опору. Напорно-разводящий трубопровод 10 подводят к баку. Отвод воды из бака происходит через обратный клапан у нижнего уровня, а конец напорной трубы доводят до верхнего уровня. Для удобства обслуживания к баку приваривают внешнюю 17 и внутреннюю 18 лестницы, оборудуют люком 16, датчиком уровня 14 и водосливной трубой 13, исключающей перенаполнение бака водой в случае, когда не срабатывает датчик верхнего уровня. На водопроводе ставят манометр 8 и задвижки 9.

На рисунке 2.93, б приведен электродный датчик уровня, который состоит из защитного корпуса 20, скобы 19 для крепления датчика в баке и трубчатых электродов верхнего уровня 21, нижнего уровня 23 и общего 22. Для предотвращения обмерзания элект-

родов в холодное время внутри центрального электрода установлен нагревательный элемент.

Электрическая принципиальная схема управления башенной установкой для подачи воды показана на рисунке 2.93, в.

В схеме предусмотрены ручной и автоматический режимы работы водокачки, которые устанавливаются переключателем *SA*.

В автоматическом режиме (переключатель *SA1* установлен в положение *A*), если в башне отсутствует вода, контакты датчиков верхнего уровня *SL1* и нижнего уровня *SL2* разомкнуты. Следовательно, контакты *KVI:1* реле *KVI* в цепи катушки магнитного пускателя *KM1* замкнуты. Магнитный пускатель срабатывает и через силовые контакты *KM1:1* обеспечивает питание электронасоса *M*. При поступлении воды в башню перекрываются водой сначала контакты *SL2* датчика нижнего уровня, а затем *SL1* датчика верхнего уровня, и катушка реле *KVI* через воду попадает под напряжение. Kontakтами *KVI:1* оно разрывает цепь питания катушки магнитного пускателя *KM1*, и электронасос *M* отключается. Реле *KVI* остается включенным через контакты *SL1*, *KVI:2* и *SL2*. Это реле отключится лишь в случае, когда вода разомкнет контакты датчиков как верхнего, так и нижнего уровней. В этом случае контакты *KVI:1* в цепи магнитного пускателя *KM1* вызовут вторичное включение электродвигателя насоса *M*. Отключенное состояние насоса определяют по сигнальной лампе *HL1*, а включенное по сигнальной лампе *HL2*, обычно зеленого и красного цветов соответственно.

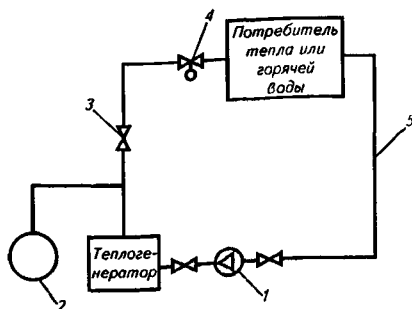
Для защиты электродвигателя насоса от перегрузок в схеме управления предусмотрены тепловые расцепители магнитного пускателя *KM1* и автоматического выключателя *QF*. В холодное время года выключателем *S* включается обогреватель датчика *EK1*, который предотвращает обледенение и вмерзание электродов датчика уровня в лед. Наряду с описанной схемой управления широко применяют также для управления работой водокачек башенного типа станции управления типа ШЭТ и «Каскад».

Элементы систем отопления и горячего водоснабжения. На рисунке 2.94 схематически показана циркуляционная система отопительной установки и установок ГВС.

Понять принцип работы этих установок легче, если представить, что вода в трубо-

Рис. 2.94. Функциональная схема циркуляционной системы отопительной установки и установок ГВС:

1 — циркуляционный насос; 2 — расширительный насос; 3 — входящий трубопровод; 4 — регулирующий элемент; 5 — обратный трубопровод



проводе должна постоянно находиться в движении. Эти системы можно разделить на следующие основные части: элементы, производящие тепло; систему переноса и распределения тепла; потребители тепла или горячей воды и регулирующие элементы.

Элементы, производящие тепло, или теплогенераторы, — отопительные котлы, работающие на газе, на жидком или твердом топливе, а также циркуляционные водонагреватели и электрические теплонакопительные устройства с централизованным нагревом воды, теплопередающие станции и тепловые насосы.

Система переноса и распределения тепла — все трубопроводы, распределительные и накопительные станции, а также циркуляционный насос.

При расчете подачи насоса в системах горячего, холодного водоснабжения, а также в системах отопления следует учитывать только потери на трение в трубопроводе. Высота, на которую подается вода, не имеет значения, так как теплоноситель — специально подготовленная вода, подаваемая насосом в подающий трубопровод, толкает воду в обратном трубопроводе в направлении котла. Возможное остаточное давление на всасывающем патрубке насоса негативно сказывается на продолжительности эксплуатации насоса.

Потребители горячей или холодной воды — расходные краны, которые устанавливаются для удобства проведения каких-либо процессов с использованием воды, например умывальники, ванны для мытья оборудования и т. д.

Потребители тепла — отопительные поверхности в отапливаемых помещениях (радиаторы, конвекторы, пластинчатые отопительные элементы и т. д.). Известно, что тепловая энергия перетекает из точек с более высокой температурой в точки с более низкой температурой, и тем быстрее, чем больше разница температур. Эта передача осуществляется теплопередачей, конвекцией или тепловым излучением.

Без достаточного регулирования невозможно решить ни одну техническую проблему. Таким образом, в любой отопительной установке также имеются *регулирующие системы*. К ним относят термостатические вентили для поддержания постоянной температуры в помещении, а также современные механические, электрические и электронные регулирующие устройства, имеющиеся в отопительных котлах, смесителях, насосах.

Насосы для систем водоснабжения. По конструктивному исполнению различают следующие насосы:

с рабочими колесами, свободно перемещающимися вдоль вала. Осевое гидравлическое усилие, возникающее при работе насоса, воспринимается обоймами лопаточных отводов каждой ступени;

с рабочими колесами, зафиксированными на валу. Осевое гидравлическое усилие воспринимается опорным устройством, расположенным в электродвигателе;

с литыми («горшковыми») лопаточными отводами. Ступени насосов — полусевого типа. Рабочие колеса зафиксированы на валу, осевое гидравлическое усилие воспринимается опорным устройством, расположенным в электродвигателе.

В приводе насосов используют однофазный или трехфазный электродвигатель с изолированным от воды статором. Широко применяемые погружные насосы типа ЭЦВ имеют трехфазный электродвигатель. Корпус электродвигателя заполнен водой и изолирован резиновым сальником. Подшипники резинометаллические, текстолитовые или пластмассовые. В качестве смазки использована вода, находящаяся в полости корпуса. Валы погружно-электродвигателя и насоса соединены жесткой муфтой.

Разработаны конструкции двух типов центробежных моноблочных электронасосов ЦМВП4-40 и ЦМВ10-50. Эти насосы предназначены для механизации подъема воды из шахтных колодцев и открытых водоемов. Ими откачивают воду с температурой до 35 °С, с содержанием механических примесей до 0,02 % по весу и минерализацией до 5 г/л.

На рисунке 2.95 показан погружной насос для подъема воды из скважин и колодцев.

Одно из перспективных направлений в развитии моноблочных водозаполненных электронасосов — создание двухрежимных насосов. Такие агрегаты предназначены для подъема воды из открытых источников и шахтных колодцев, а также для установки на насосных станциях второго подъема. Рабочие колеса этих насосов можно устанавливать как последовательно (для увеличения напора за счет увеличения числа ступеней), так и параллельно (для увеличения подачи). Таким образом, характеристики одного насоса охватывают широкий диапазон подач и напоров и тем самым позволяют значительно сократить номенклатуру применяемых насосов.

Регулирование частоты вращения. С начала 80-х гг. прошлого столетия выпускают насосы с мокрым ротором с переключени-

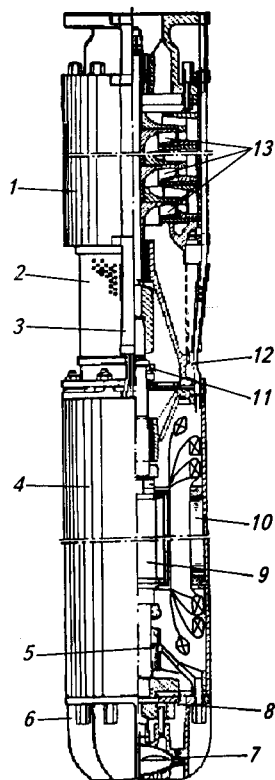


Рис. 2.95. Погружной электронасосный агрегат:

1 — корпус насоса; 2 — сетка; 3 — кожух кабеля; 4 — корпус; 5 — подшипник; 6 — днище; 7 — диафрагма; 8 — упорный подшипник; 9 — ротор; 10 — статор; 11 — торцевое уплотнение; 12 — токоподводящий кабель; 13 — рабочие колеса

ем ступеней частоты вращения. Чтобы была возможность изменять частоту вращения электродвигателей приводов насосов, их изготавливают с различным числом обмоток. Если поступает немного жидкости по трубам системы отопления или водоснабжения и в системе такое же незначительное сопротивление трубопровода, то насос может работать с незначительным напором. Одновременно сокращается потребляемая электродвигателем мощность.

Благодаря небольшим габаритным размерам преобразователи частоты стали устанавливать непосредственно в клеммную коробку насоса. Встроенный частотный преобразователь, регулирующий частоту вращения, поддерживает напор на постоянном уровне, вне зависимости от подачи, климатических условий и области применения насоса.

Если в отопительной системе установлен новый насос с мокрым ротором, то значение его подачи, м³/ч,

$$Q = 0,86 Q_{т.зд} / \Delta T, \quad (2.118)$$

где $Q_{т.зд}$ — тепловая потребность здания, справочная величина; ΔT — разница температур между подающим и обратным трубопроводом, К.

Жидкость должна транспортироваться в любую точку системы водоснабжения или отопления, так как напор насоса должен превосходить сумму всех потерь давления на трение в трубопроводе, т. е. потери напора. Их рассчитывают по формуле

$$\Delta H = \frac{RL + \sum k_{соп}}{9,81q}, \quad (2.119)$$

где ΔH — потери напора, м; R — сопротивление трения прямой трубы, мбар/м; L — общая длина трубопровода до самого удаленного нагревательного элемента, м; $k_{соп}$ — коэффициенты сопротивления на фитинги, арматуру, смесители, мбар; 9,81 — значение ускорения свободного падения, м/с²; q — плотность теплоносителя, для воды $q = 1$ кг/дм³.

Аналогично формуле (2.108) определяют мощность нагрузки на валу ЭП насоса для подачи жидкости

$$P_n = \frac{9,81QHq}{\eta_n \eta_{пер}}, \quad (2.120)$$

где η_n — КПД насоса, значения для разного типа насосов приведены в справочной литературе и разделе 1; $\eta_{пер}$ — КПД механической передачи.

Данный тип насосов применяют для подачи холодной и горячей воды без абразивных веществ в системах отопления, установках холодной и охлаждающей воды.

Существует большое число приборов управления и систем регулирования отечественного и зарубежного производства. Пример такой системы приведен на рисунке 2.96.

Системы бесступенчатого регулирования на базе преобразователей частоты, с числовым управлением, для всех типов насосов с сухим и мокрым ротором как одинарных, так и группы насосов широко применяют в устройствах циркуляции воды, водоснабжения и повышения давления в жилых и административных зданиях и в производственных помещениях.

Их недостаток — высокая стоимость, но, несмотря на это, внедрение этих систем способствует энергосбережению.

Электроустановки для получения горячей воды и пара. Основные потребители пара и горячей воды в сельскохозяйственном производстве — животноводческие фермы и птицефабрики, предприятия защищенного грунта и перерабатывающей промышленности, фермерские хозяйства и другие мелкие потребители. В производственных и бытовых помещениях этих объектов горячую воду и пар используют для обогрева, на технологические и санитарно-гигиенические нужды, для приготовления кормов и переработки продукции.

Электронагрев воды и выработку пара осуществляют элементами и электродными водонагревателями, а также паровыми установками.

В особенных случаях водоснабжение горячей водой обеспечивают от электродных, выполненных на базе электродных водогрейных и паростановок децентрализованного типа. Использование таких установок возможно лишь в тех случаях, когда затраты на строительство водопровода и установку котельной на газе или твердом топливе превышают стоимость электроэнергии. Наиболее эффективно применение электродных в ночные часы при минимуме нагрузок в электрических сетях, при аккумуляровании тепловой энергии и наличии соответствующей автоматики.

К *элементным* электроводонагревателям относят установки, в которых происходит косвенный нагрев воды путем передачи ей теплоты от поверхности нагревателя без соприкосновения ее с токоведущими частями электронагревательного устройства. В каче-

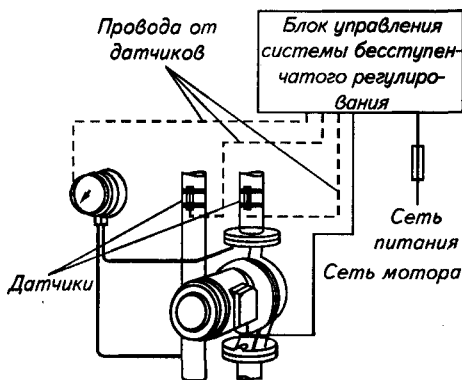


Рис. 2.96. Система бесступенчатого регулирования для систем отопления

стве нагревательных устройств в основном применяют трубчатые электронагреватели (ТЭН), а также слюдопластовые, керамические и другого типа нагреватели закрытого исполнения.

По принципу работы элементные электроводонагреватели подразделяют на *емкостные периодического действия* и *проточные непрерывного действия*.

Емкостные электроводонагреватели. Промышленность в России выпускает в основном емкостные электроводонагреватели типа ЭВН, которые используют для нагрева воды, потребляемой на технологические и санитарно-гигиенические нужды в животноводческих фермах для поения животных, приготовления кормов, подмывания вымени, промывки молокопровода и молочной посуды, а также гаражах, мастерских, предприятиях бытового и коммунального назначения.

Электроводонагреватель типа ЭВН представляет собой теплоизолированный бак соответствующей вместимости, в который вмонтированы блок нагревателей из ТЭН, датчик температуры электронного терморегулятора и предохранительный клапан. Пространство между резервуаром и кожухом заполнено теплоизоляцией. На корпусе водонагревателя размещен щит автоматического управления, в который входят автоматический выключатель, магнитный пускатель и терморегулятор. Холодная вода через входной вентиль и обратный клапан поступает в нижнюю часть емкости и заполняет ее. Когда вода нагреется до 85 °С, с помощью терморегулятора автоматически выключаются электронагревательные элементы.

Разбор нагретой воды осуществляют через выходной патрубок путем открытия вентиля на входном патрубке и вытеснения ее за счет давления в питающей водопроводной магистрали. Ставить запорный вентиль на патрубке выхода горячей воды категорически запрещается.

Элементные водонагреватели типа ЭВН в заводском исполнении применяют чаще всего в открытых системах горячего водоснабжения, без противодавления, в технологических процессах с прерывистым циклом разбора воды при использовании ее, например на гигиенические нужды, при промывке молочного оборудования в системе доения, для приготовления кормов и т. д.

Проточный электроводонагреватель. Он представляет собой сосуд, внутри которого находятся трубчатые нагревательные элементы (ТЭН), а его корпус снабжен предохранительным клапаном и защитным термореле, встроенным в крышку и отключающим блок ТЭН при температуре воды свыше 95 °С для защиты от взрыва или сгорания нагревательных элементов. Электроводонагреватели имеют отдельный щит управления. Питание этого типа водонагревателей осуществляют от сети напряжением 380/220 В с подключением ТЭН по схеме «звезда».

Системы автоматики при эксплуатации водонагревателей на твердом и жидком топливе. Несмотря на достоинства электропароводонагревателей, их применение ограничено высокой стоимостью электроэнергии. Поэтому во многих населенных пунктах, а особенно в сельской местности применяют водогрейные установки

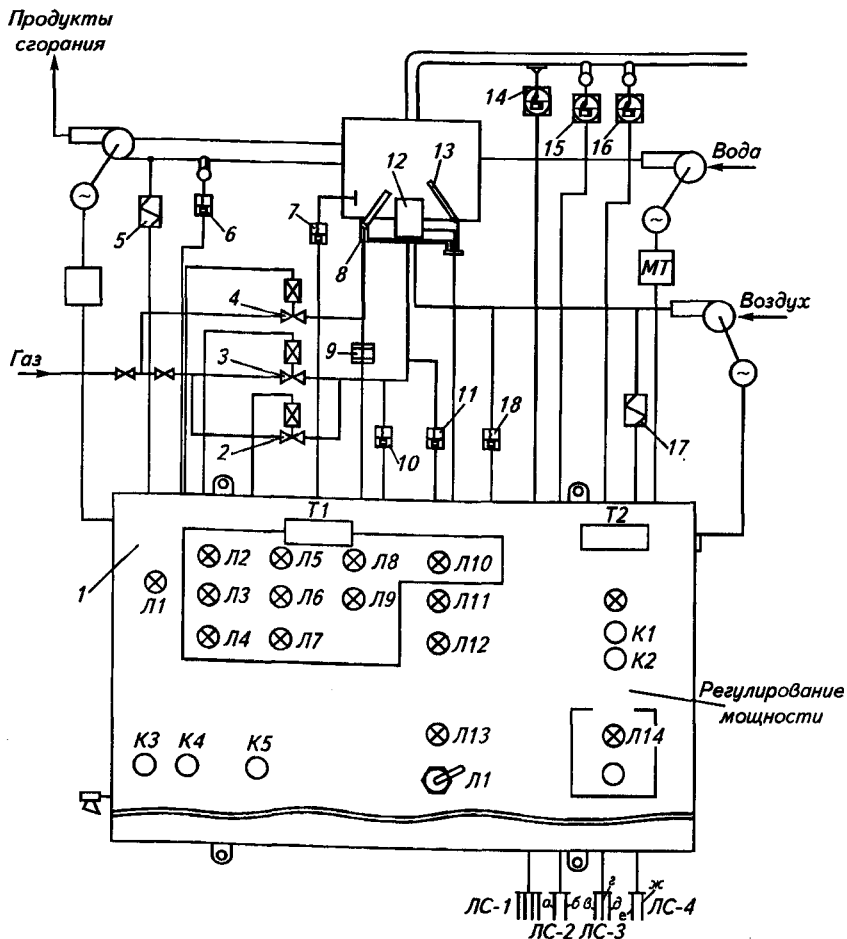


Рис. 2.97. Принципиальная схема комплекта средств управления КСУ-1-Г:

1 — шкаф комплекта; 2, 3 — отсекающие клапаны; 4 — клапан-отсекатель запальника; 5, 7 — исполнительные механизмы; 6 — датчик-реле температуры; 7, 10, 11, 18 — датчики-реле тяги, напора, давления; 8 — электрозапальник; 9 — катушка зажигания; 12 — горелка; 13 — контрольный электрод; 14 — манометр электроконтактный; 15, 16 — термометры манометрические; T1 — табло «Авария»; T2 — табло «Работа»; Л1...Л14 — лампы; К1...К5 — кнопки управления; Л1 — переключатель «Работа с общеотельным устройством»; ЛС1 — «Питающая сеть 380/220 В, 50 Гц»; ЛС2 — «Сигналы диспетчеру»; ЛС3 — «Дистанционное управление»; ЛС4 — «Сигналы от общеотельного устройства регулирования»

и парогенераторы на твердом, жидком и газообразном топливе. Электрооборудование таких установок в основном определяется системами автоматики. Рассмотрим комплект средств управления КСУ-1-Г. Он предназначен для паровых и водогрейных котлов малой мощности, работающих на жидком и газообразном топливе.

Для водогрейных котлов комплект выпускают в двух модификациях КСУ-1-Г-2 и КСУ-1-Г-3, работающих на газе низкого и среднего давления соответственно.

На рисунке 2.97 показана принципиальная схема комплекта средств управления КСУ-1-Г.

Электронные схемы комплекта КСУ-1-Г выполнены на базе элементов дискретной автоматики, реализованной с помощью микросхем, транзисторов и других электрорадиоэлементов.

При работе с общекотельным устройством комплект средств управления выполняет следующие команды:

сигнал на останов котла;

сигнал на пуск котла;

сигнал открытия регулирующих органов на «большое» горение;

сигнал открытия регулирующих органов на «малое» горение.

Отечественная и зарубежная промышленность выпускает широкий модельный ряд котельного оборудования на рынок. При этом некоторые фирмы проводят гарантийное и послегарантийное обслуживание поставляемой техники. Особенно стоит отметить, что эксплуатация котельного оборудования требует строгой дисциплины от обслуживающего персонала и соблюдения Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок, Правил применения и безопасной эксплуатации тепловых энергоустановок, другой нормативно-технической документации, а также специальных требований Госэнергонадзора, Госгортехнадзора и котлонадзора.

2.8.8. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, СВАРОЧНЫХ И НАПЛАВОЧНЫХ УСТАНОВОК, МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ, СТЕНДОВ ДЛЯ ОБКАТКИ И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Электрооборудование и управление подъемно-транспортными механизмами. На ремонтных заводах и в мастерских для подъема, опускания и перемещения ремонтируемых агрегатов, машин и оборудования используют *тали* и *тельферы* грузоподъемностью до 5 т. На рисунке 2.98 показана электрическая схема управления тельфером.

Обычные тельферы имеют два электродвигателя — для подъема

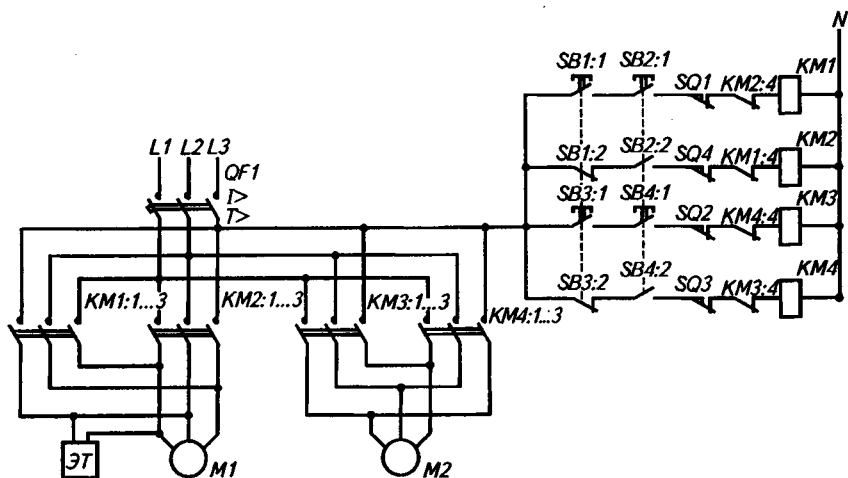


Рис. 2.98. Принципиальная электрическая схема управления тельфером

M1 и перемещения *M2*. Управляют тельфером при помощи кнопочной станции. Электродвигатель *M1* приводит во вращение барабан. Перемещаются тельфер и груз, закрепленный на крюке, по двутавровой балке на ходовых колесах, которые приводятся во вращение электродвигателем *M2* через редуктор. Обычно электропитание к электродвигателю подводится на кабель-шторке.

Электродвигатели тельфера работают, пока нажаты пусковые кнопки подъема груза *SB1*, спуска *SB2*, перемещения вперед *SB3* и назад *SB4*, так как при этом получают питание катушки соответствующих магнитных пускателей *KM1...KM4* и электродвигатели, управляемые ими.

Конечные выключатели ограничивают перемещение груза при его подъеме *SQ1* и горизонтальном передвижении *SQ2* и *SQ3*.

Для исключения самопроизвольного опускания груза электродвигатель подъема имеет электромагнитный тормоз *ЭТ*, который при включенном электродвигателе освобождает барабан, а в отключенном положении стопорит его.

Электрооборудование и управление сварочными и наплавочными установками. Сварочные трансформаторы — это источники пониженного напряжения переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Их используют в установках электродуговой сварки на переменном токе, а совместно с выпрямителем — на постоянном. Они представляют собой специальные одно- и трехфазные понижающие трансформаторы с вторичным напряжением холостого хода 60...100 В и рабочим 25...40 В, обладающие по отношению к

нагрузке падающей внешней вольт-амперной характеристикой. Падающая вольт-амперная характеристика необходима для обеспечения зажигания и устойчивого горения сварочной дуги. Такую характеристику получают за счет включения в сварочную цепь трансформатора индуктивного сопротивления рассеяния в виде дросселя с ферромагнитным сердечником.

Сварочные выпрямители — источники питания для сварки постоянным током, который обеспечивает более устойчивое горение электрической дуги по сравнению с переменным током.

Сварочные выпрямители принципиально мало отличаются один от другого и имеют следующие основные части: трехфазный сварочный трансформатор, трехфазный мостовой выпрямитель неуправляемый (диодный) или управляемый (тиристорный, диодно-тиристорный) и в ряде случаев дроссель с ферромагнитным сердечником. Для охлаждения трансформатора и вентилей выпрямителя служит электровентилятор (рис. 2.99).

Устройство включают в работу автоматическим выключателем *QF1*, который своим блок-контактом подает питание на катушку магнитного пускателя *KM1*, а последним контактами *KM1:1...3* подает питание на сварочный выпрямитель. Такое построение схемы исключает включение сварочного выпрямителя с неработающим электровентилятором охлаждения *M*.

Способы ступенчатого и плавного регулирования силы сварочного тока сварочных выпрямителей такие же, как и у сварочных трансформаторов, так как они их составная часть. При использовании управляемых выпрямителей дополнительно появляется возможность плавного регулирования сварочного тока изменением угла включения тиристорных выпрямительного моста.

Электрооборудование и управление металлообрабатывающими и деревообрабатывающими станками. Каждый вид обработки на ме-

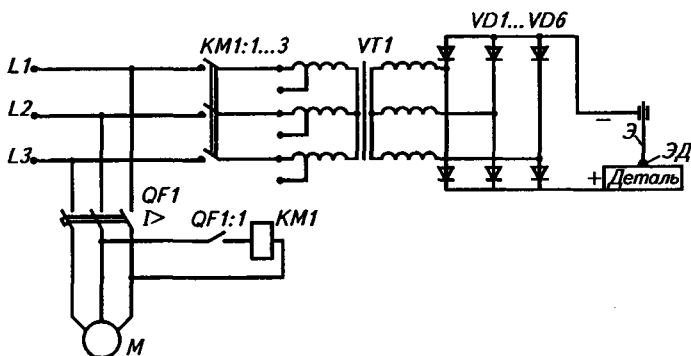


Рис. 2.99. Типовая электрическая схема сварочного выпрямителя

таллорезущих станках характеризуется оптимальными значениями скоростей, усилий, мощностей, найденными в результате научно-исследовательской и экспериментальной работ и собранными в специальных изданиях бюро технических нормативов.

Скорость, усилие и мощность резания можно определить по специальным картам технологических нормативов или по теоретическим формулам с экспериментальными коэффициентами. Расчет начинают с выбора марки инструментального материала, геометрической формы режущей части инструмента, значений глубины резания и подачи.

Ориентировочная мощность

$$P_{дв} = (1,1 \dots 1,2) P_{дв.ср}, \quad (2.121)$$

где $P_{дв.ср}$ — средняя мощность за цикл;

$$P_{дв.ср} = \frac{\sum P_{двК} t_K}{t_{ц}}, \quad (2.122)$$

где $P_{двК}$ — мощность двигателя на участке K ; t_K — продолжительность работы двигателя на участке K ; $t_{ц}$ — продолжительность цикла.

По каталогу выбирают двигатель. Рассчитывают номинальные потери (ΔP_H) и потери на каждом участке

$$\Delta P_i = P_i \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (2.123)$$

где η_i — КПД двигателя на каждом участке. Методика его определения изложена в разделе 1.

При соблюдении условия $\Delta P_{ном} \geq P_{дв.ср}$ останавливаются на выбранном двигателе, в противном случае повторяют расчет для двигателя ближайшей большей мощности.

Суммарное усилие сопротивления резанию, приведенное к единице площади поперечного сечения (1 мм^2) стружки, нормального к направлению пути резания в каждой точке траектории лезвия резца, называют *удельным сопротивлением резанию k* (Н/мм^2). Работу, затрачиваемую на превращение 1 мм^3 древесины в стружку, называют *удельной работой резания* ($\text{Н}\cdot\text{м/мм}^3$); она численно равна k . Удельная работа резания дает возможность определить мощность резания $P_{рез}$, Вт, по секундному объему снятой древесины, умноженному на k :

$$P_{рез} = kbhu. \quad (2.124)$$

Поэтому сила резания, H ,

$$F = \frac{kbhu}{v}, \quad (2.125)$$

где k — удельное сопротивление резанию, $k = 10 \dots 46$ (по экспериментальным данным, зависящее от подачи и породы древесины), Н/мм^2 ; b — ширина снимаемого слоя древесины, мм ; h — высота снимаемого слоя, мм ; u — скорость подачи (0,3...3 мм на один нож); v — скорость резания, м/с .

Режим работы двигателя зависит от организации подачи: если брус поступает за брусом без перерыва, то режим работы длительный; в противном случае — повторно-кратковременный.

Напряжение на схему управления (рис. 2.100) подается пакетным выключателем $QF1$. При пуске нажимают кнопку $SB2$, замыкая цепь тока катушки магнитного пускателя $KM1$, включается двигатель M силовыми контактами $KM1:3 \dots 5$ и происходит разгон агрегата. Замыкающие блок-контакты $KM1:1$ шунтируют кнопку $SB2$, а размыкающие $KM1:2$ открываются в цепи катушки $KM2$. Когда угловая скорость составляет 0,1 от номинальной, то закрываются замыкающие контакты реле контроля скорости BR , подготавливая цепь пускателя $KM2$. При нажатии кнопки $SB1$ обесточивается катушка магнитного пускателя $KM1$, закрываются размыкающие блок-контакты $KM1:2$, и двигатель переходит в режим торможения противо-

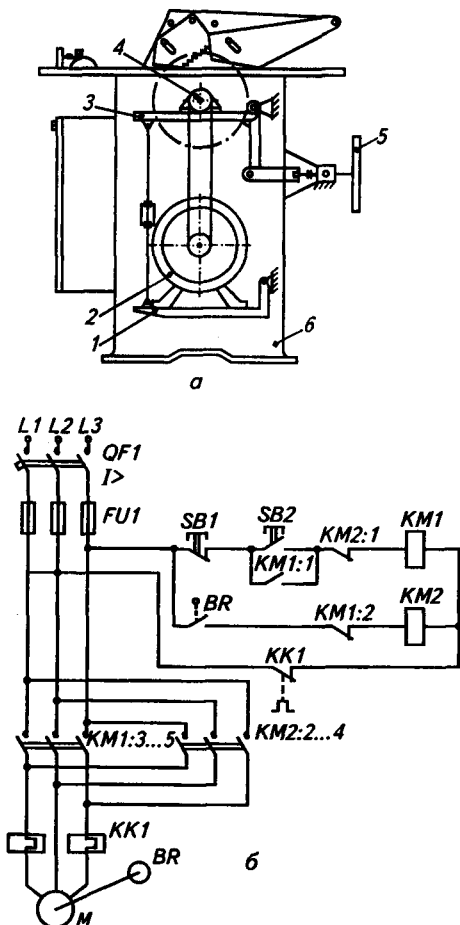


Рис. 2.100. Привод круглопильного станка Ц-6:

a — кинематическая схема; b — электрическая схема; 1 — подмоторная плита; 2 — электродвигатель; 3 — плита пильного вала; 4 — пильный вал; 5 — ручной привод; 6 — станина

включением, его угловая скорость резко снижается. Наиболее эффективен вариант настройки реле контроля скорости при торможении, когда оно размыкает свои контакты в момент, от которого до остановки двигателя проходит время, равное собственному времени отключения тормозного пускателя *КМ2* (приблизительно 0,1 с). При такой настройке двигатель отключается от сети в момент остановки ротора.

Электрооборудование и управление обкаткой и испытанием двигателей внутреннего сгорания. Стендовая обкатка и испытание автотракторных двигателей после сборки — важнейшая операция в технологическом процессе ремонта. Различают два режима обкатки — *холодная* и *горячая*. В первом режиме обкатки вначале двигатель с фазным ротором разгоняет холодный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) до номинальной частоты вращения электродвигателя $n_{д.ном}$. Плавность пуска обеспечивают постепенным изменением сопротивления в цепи ротора. После этого в ДВС подается топливо, он самостоятельно увеличивает частоту вращения до номинальной, что выше синхронной частоты вращения электродвигателя, который при этом работает в режиме асинхронного генератора. Требуемую нагрузочную характеристику асинхронного генератора устанавливают с помощью реостата в цепи ротора.

Мощность электродвигателя для его генераторного режима

$$P = P_{ном ДВС} / k, \quad (2.126)$$

где $P_{ном ДВС}$ — номинальная мощность ДВС, кВт; k — безразмерный коэффициент, $k = k_1 k_2 k_3 k_4 > 1$.

Коэффициент

$$k_1 = \frac{1}{\eta_{ном.дв} \eta_{ном.г}}, \quad (2.127)$$

где $\eta_{ном.дв}$, $\eta_{ном.г}$ — номинальные КПД электродвигателя в двигательном и генераторном режимах соответственно, $\eta_{ном.г} = \frac{1}{2 - \eta_{ном.дв}}$.

Тогда

$$k_1 = \frac{2 - \eta_{ном.дв}}{\eta_{ном.дв}}$$

Коэффициент

$$k_2 = n_{ном ДВС} / n_{ном.г}$$

учитывает то, что номинальная частота вращения ДВС может быть выше номинальной частоты вращения электродвигателя в режиме

асинхронного генератора, но не должен превышать допустимую частоту вращения электродвигателя, равную $n_{\text{доп}} = 2n_0$.

Коэффициент k_3 отражает улучшение условий охлаждения электродвигателя при частоте вращения $n_{\text{дв}} > n_0$. Его определяют по формуле

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 + 0,5\sqrt{(n_{\text{дв}}/n_0)v}}{1 + 0,5\sqrt{v}}}(\alpha + 1) - \alpha, \quad (2.128)$$

где v — скорость вентилирующего воздуха в машине, принимают равной 10...15 м/с; α — отношение постоянных потерь к переменным (раздел 1).

Коэффициент k_4 учитывает то, что при максимальной нагрузке в тормозном режиме по условиям технологии обкатки электродвигатель работает только в кратковременном режиме. Тогда из уравнения нагрева двигателя коэффициент k_4 равен

$$k_4 = \sqrt{\frac{\Theta_{\text{ном}} \left[1 - (\Theta_{\text{нач}} / \Theta_{\text{ном}}) e^{-t/T_n} \right]}{\Theta_{\text{ном}} (1 - e^{-t/T_n})}}(\alpha + 1) - \alpha, \quad (2.129)$$

где $\Theta_{\text{ном}}$ — номинальное превышение температуры электродвигателя, $\Theta_{\text{нач}}$ — начальное превышение температуры электродвигателя; t — продолжительность работы при максимальной нагрузке; T_n — постоянная времени нагрева электродвигателя.

Электродвигатель соединен с ДВС шарнирным валом. Для плавного регулирования частоты вращения и загрузки электродвигателя применен жидкостный реостат в цепи ротора.

На рисунке 2.101 приведена схема обкаточно-испытательного стенда ДВС.

В стенде (см. рис. 2.101) токи обмоток ротора выпрямляются выпрямителями 22, 23 и 24, инвертируются трехфазным инвертором тока ИТ и через согласующий трансформатор 15 направляются в сеть. Благодаря наличию асинхронно-вентильного усилителя в сеть возвращается (рекуперировается) до 80 % потребляемой стендом энергии.

Управление режимами обкатки стенда осуществляется с помощью датчиков 2 вращающего момента, датчика 4 скорости изменения температуры, датчиками температуры масла в смазочной системе, тахометром 14 (датчиком частоты вращения), усилителями-преобразователями 5, 6, 8 и 11, сравнивающими органами 10 и 7, задатчиками программы обкатки 9 и вращающего момента 13 и блоком 12, группами клапанов 19, 20 и 21 инвертора тока ИТ. Трансформатор инвертора тока имеет вторичную трехфазную об-

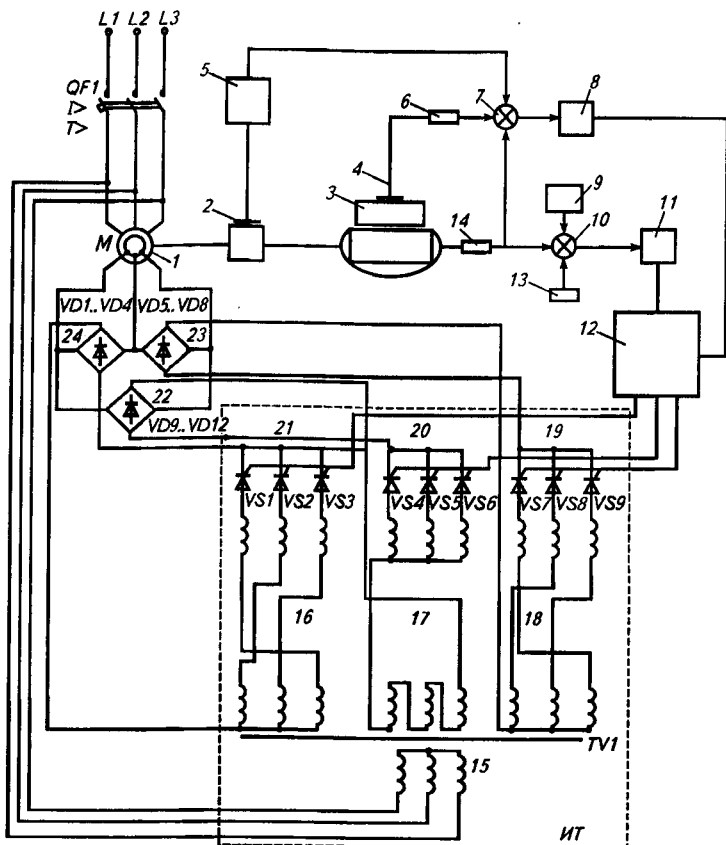


Рис. 2.101. Электрическая схема обкаточно-испытательного стенда:

1 — электродвигатель; 2, 4 — датчики; 3 — обкатываемый двигатель внутреннего сгорания; 5, 6, 8, 11 — усилители-преобразователи; 7, 10 — сравнивающие органы; 9 — задатчик программы обкатки; 12 — блок управления; 13 — задатчик вращающего момента; 14 — тахометр; 15 — вторичная обмотка трансформатора инвертора тока; 16, 17, 18 — первичные обмотки трансформатора инвертора тока; 19, 20, 21 — группа вентиля трансформатора; 22, 23, 24 — выпрямители

мотку 15 и три секционированные первичные трехфазные обмотки 16, 17 и 18. Задатчиками 13 задают временные программы нарастания частоты вращения и тормозного момента при обкатке двигателя с учетом температуры нагрева масла. В органах сравнения 10 и 7 происходит сравнение фактических значений частоты и момента вращения с заданными значениями. При помощи усилителей 8, 11, блока управления 12 и инвертора тока ИТ происходит обработка заданной программы обкатки.

Переход с одного режима на следующий происходит автоматически от датчика 4, который реагирует на скорость изменения температуры масла. Если при холодной обкатке температура масла в смазочной системе прекращает свой рост, то происходит увеличение частоты вращения двигателя на ступень. При повторной стабилизации температуры вырабатывается сигнал для перехода на следующую ступень обкатки.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите группы, на которые подразделяют электрифицированные сельскохозяйственные механизмы. 2. Расскажите, как работает схема автоматического управления топки зерносушилки. 3. Объясните работу схемы автоматического управления кормораздатчика ТВК-80Б. 4. Какие системы электрообогрева используют при выращивании молодняка животных? 5. Для чего предназначен и как работает терморегулятор ТРМ32-Щ4? 6. Какие электроустановки применяют для обогрева животных? 7. Расскажите, какие требования предъявляют к электроприводу поточных линий. 8. Какие основные элементы содержат в себе системы подачи горячей воды? 9. Объясните работу электрической принципиальной схемы водокачки башенного типа. 10. Назовите конструктивные исполнения насосов. 11. Какие установки существуют для получения горячей воды и пара? 12. Как работает принципиальная электрическая схема управления тельфером?

2.8.9. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электрические нагреватели сопротивления. *Электрический нагреватель* — основной элемент электротермической установки, преобразующий электрическую энергию в тепловую. Конструктивное исполнение электрического нагревателя определяется нагреваемой средой, характером нагрева, мощностью, технологическим назначением и другими условиями.

В зависимости от конструкции и технологического назначения электрические нагреватели выполняют с диэлектрической изоляцией, защитными устройствами, с устройством для крепления и устройством для подвода электрического тока.

По исполнению различают *открытые, защищенные и герметические нагреватели*. В нагревателях открытого исполнения резистивное тело — нагревательное сопротивление — не изолируют от нагреваемой среды, а размещают непосредственно в ней.

Нагреватели из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением изготавливают в виде проволочных или ленточных зигзагов, проволочных спиралей (рис. 2.102) и крепят на керамических стержнях, трубах или изоляторах в воздушном потоке (электрокалориферы) или в воздушном пространстве (электропечи) электротермических установок.

Преимущества открытых нагревателей — простота устройства, ремонтоспособность и возможность обеспечения высокой теплоотдачи с поверхности нагревательного элемента.

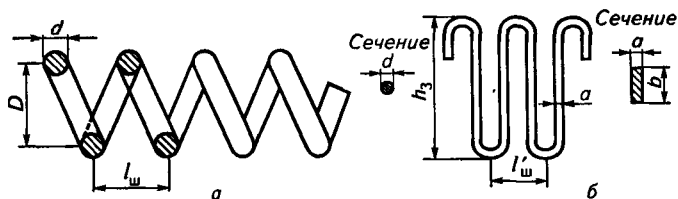


Рис. 2.102. Открытые нагреватели:

a — спиральный; *б* — проволочный и ленточный зигзагообразные; *D* — диаметр витка спирали; *d* — диаметр проволоки спирали; *l*_ш — шаг спирали; *h*_з — высота зигзага; *l*'_ш — шаг волны; *a*, *b* — размеры сечения ленты

Недостатки — сравнительно низкий срок службы, невысокая механическая прочность и невозможность использования в агрессивных средах.

Наиболее совершенные и универсальные герметические нагреватели — это *трубчатые электронагреватели* (ТЭН). Их эффективно используют в электрокалориферах, водонагревателях, электрических печах, теплоаккумулирующих установках, электрочайниках, бытовых плитах и др. Промышленность выпускает ТЭН напряжением от 12 до 380 В, мощностью от 100 до 25 000 Вт, развернутой длиной от 0,25 до 6,3 м и диаметром трубки от 6 до 16 мм.

ТЭН (рис. 2.103) представляет собой тонкостенную металлическую трубку (оболочку), в которую запрессована спираль из проволоки с большим удельным электрическим сопротивлением. Концы спирали приварены к контактным стержням, снабженным с внешней стороны контактными устройствами для подключения

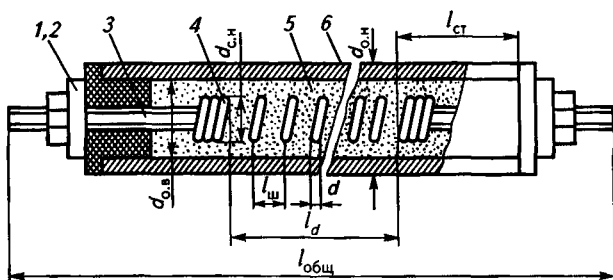


Рис. 2.103. Трубчатый электронагреватель (ТЭН):

1 и *2* — контактное устройство; *3* — контактный стержень; *4* — нагревательная спираль; *5* — наполнитель (периклаз); *б* — оболочка (трубка) ТЭН; *d*_{о.н} и *d*_{о.в} — наружный и внутренний диаметры оболочки ТЭН соответственно; *d*_{о.н} — наружный диаметр спирали ТЭН; *d* — диаметр проволоки спирали; *l*_{ст} — длина контактного стержня в заделке; *l*_ш — шаг спирали; *l*_д — длина спирали; *l*_{общ} — общая длина

к сети. Спираль изолируют от стенок трубки наполнителем из периклаза (плавленная окись магния), обладающим высокими диэлектрическими свойствами и теплопроводностью. В качестве наполнителя допускается использовать кварцевый песок, электрокорунд и другие материалы. Торцы трубки герметизируют теплоустойчивым составом и изолирующими втулками, что исключает доступ воздуха и влаги внутрь ТЭН.

При выборе ТЭН следует обращать внимание на нагреваемую среду, допустимую поверхностную плотность теплового потока, температуру и химическую стойкость материала трубки к воздействию среды. Трубки ТЭН изготавливают из углеродистой стали, меди, латуни и нержавеющей стали. ТЭН с оболочками из нержавеющей стали применяют при температурах свыше 720 К и для нагрева агрессивных сред. К преимуществам ТЭН относят их универсальность (возможность нагрева как проводящих, так и непроводящих сред), пригодность для работы непосредственно в нагреваемой среде (корпус ТЭН не находится под напряжением), надежность (спираль герметизирована от внешней среды), ударо- и виброустойчивость (спираль плотно запрессована в наполнителе), а также безопасность обслуживания. При выборе ТЭН следует пользоваться данными специальных каталогов.

Условное обозначение трубчатого электронагревателя ТЭН — $X_1X_2X_3/X_4X_5X_6$: X_1 — развернутая длина, см; X_2 — длина контактного стержня в заделке (см. ниже); X_3 — наружный диаметр оболочки (трубки), мм; X_4 — номинальная мощность, кВт; X_5 — нагреваемая среда; X_6 — номинальное напряжение, В.

**Условное обозначение длины контактного стержня ТЭН,
выпускаемых в России**

Обозначение длины Длина стержня, мм	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
	40	65	100	125	160	250	400	630

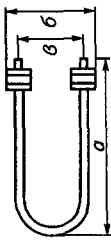
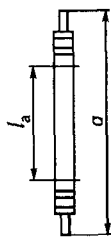
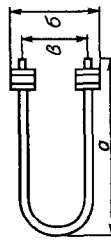
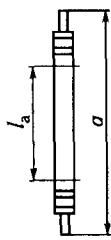
Основные технические данные некоторых ТЭН для нагрева воды и воздуха приведены в таблице 2.15.

При низкотемпературном нагреве применяют *тонкослойные поверхностно-распределенные резистивные электронагревательные элементы* (ПЭН). Наибольший интерес представляют ПЭН, изготовленные на основе композиционных материалов, которые выпускают в виде съемных электронагревателей и в виде элементов конструкции ЭТУ.

Принципиальная схема ПЭН, совмещенного с конструкцией электроковрика, показана на рисунке 2.104.

Токопроводящая пленка электронагревателя с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления нанесена на тонколистную штампованную металлическую панель, покрытую стеклоэмалевой изоляцией. Для подвода тока пленка снабжена контактными электродами в виде полос из латуни (меди). Сверху

2.15. Основные технические данные трубчатых электронагревателей (ТЭН)

Тип электронагревателя	Номинальная мощность одного элемента, кВт	Поверхностная плотность теплового потока, Вт/см ²	Габариты, мм		Активная длина l_a , мм	Общий вид		
			a	b				
ТЭН-32А10/0,4Р220	0,4	120,88	5,3	171	60	50	240	
ТЭН-32А13/1Р220	1,0	48,35	10,21	183	96	83	240	
ТЭН-120Б13/2Р220	2,0	24,2	4,58	611	80	73	1070	
ТЭН-140Б13/3,15Р220	3,15	15,36	6,08	711	86	73	1270	
ТЭН-200Б13/4Р220	4,0	12,1	5,24	1011	86	73	1870	
ТЭН-60А13/0,8Р220	0,8	60,44	5,77	650	—	—	520	
ТЭН-60А13/1,6Р220	1,6	30,26	7,54	830	—	—	700	
ТЭН-120Б13/2,5Р220	2,5	19,37	5,72	1250	—	—	1070	
<i>Для нагрева воды, слабых растворов кислот и щелочей</i>								
ТЭН-60А13/0,5Э220	0,5	96,92	2,36	318	78	65	520	
ТЭН-78А13/1О220	1,0	48,4	3,5	400	106	93	700	
ТЭН-170Б13/2О220	2,0	24,2	3,12	861	86	73	1570	
ТЭН-240Д16/2,5К220	2,5	19,37	2,39	1218	86	70	2080	
ТЭН-60А13/0,8О220	0,8	60,44	3,77	660	—	—	520	
ТЭН-120Б13/1,6О220	1,6	30,26	3,92	1260	—	—	1000	
ТЭН-120Г13/1,25О220	1,25	115,5	3,22	1260	—	—	950	
ТЭН-60Б13/0,4С220	0,4	120,88	2,08	660	—	—	470	
<i>Для нагрева воздуха, газов и смесей газов</i>								

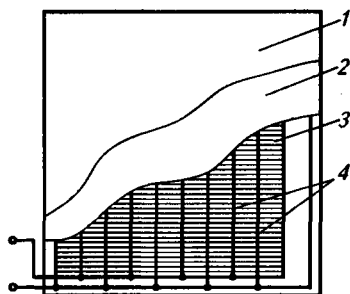


Рис. 2.104. Принципиальная схема ПЭН, совмещенного с конструкцией ЭТУ-коврика:

1 — контактная поверхность нагрева; 2 — стеклоэмалевая изоляция; 3 — токопроводящая пленка нагревательного элемента; 4 — контактные электроды в виде полос

на токопроводящую пленку нанесено теплостойкое электроизоляционное покрытие. Обогреватель работает в режиме саморегулирования.

При подаче напряжения к электронагревателю, если на нем нет животных, элемент из-за высокого коэффициента теплоотдачи нагревается только до температуры устойчивого теплового равновесия, достаточной для привлечения на него животных. Животное, располагаясь на обогревателе, своим телом нагревает место соприкосновения и уменьшает теплоотдачу в данном месте, что снижает сопротивление резистивной пленки. Благодаря этому мощность и температура нагревательного устройства автоматически увеличиваются.

Основные преимущества ПЭН — высокая антикоррозионная стойкость при работе в агрессивных средах; низкая стоимость исходного материала и технологичность изготовления самых сложных конфигураций; равномерный и дифференцированный нагрев больших поверхностей сложной формы; относительно низкая металлоемкость и высокий тепловой КПД. Недостаток — дороговизна потребляемой электроэнергии.

Материалы для электрических нагревателей. *Нагревательное сопротивление* — резистивное тело — наиболее ответственный элемент электрического нагревателя, от которого зависит надежность и долговечность его работы в заданном технологическом режиме. Поэтому к материалам для нагревательных элементов предъявляют требования, основные из которых достаточная жаростойкость и жаропрочность; кроме того, они не должны окисляться и терять механические свойства при высоких температурах.

В зависимости от температурного режима и технологических условий нагреваемой среды для изготовления электрических нагревателей используют металлические и неметаллические материалы (табл. 2.16).

2.16. Свойства материалов для нагревательных элементов

Материал	Плотность, 10^3 кг/м ³	Удельное сопротивление при 293 К, 10^{-6} Ом·м	Температурный коэффициент электрического сопротивления, 10^{-6} 1/К	Температура плавления, К	Максимальная рабочая температура, К
----------	-------------------------------------	--	---	--------------------------	-------------------------------------

Нихромы: (сплавы)

X20H80-H	8,4	1,06...1,17	35	1673	1373
X15H60-H	7,9	1,07...1,17	100	1663	1273

Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельное сопротивление при 293 К, $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Температурный коэффициент электрического сопротивления, 10^{-6} 1/К	Температура плавления, К	Максимальная рабочая температура, К
<i>Железо-хромолитиевые материалы</i>					
X23Ю5Т	7,2	1,34...1,45	—	1798	1473
X13Ю4	7,3	1,18...1,34	150	1723	1973
<i>Неметаллические материалы</i>					
Карборунд	2,3	800...1900	Переменный	—	1773
Графит	1,6	8...13	»	—	2573/3073*
Уголь	1,6	40...60	»	—	2573/3073*

* Числитель — в вакууме, знаменатель — в защитной атмосфере.

Для низко- и среднетемпературных установок широко применяют специальные сплавы: хромоникелевые и железохромоникелевые. Наиболее распространены нихромы. В низкотемпературных установках (до 620 К) электрические нагреватели выполняют из дешевого и доступного материала — углеродистой стали. Неметаллические нагреватели используют в высокотемпературных установках. В ЭТУ с рабочей температурой до 1570 К применяют стержневые цилиндрические нагреватели из карборунда, а с температурой до 1870 К — из дисилицида молибдена. В высокотемпературных вакуумных печах с температурой нагрева до 3270 К используют графитовые нагреватели в виде стержней, трубок, пластин и т. д.

В качестве нагревательных сопротивлений ПЭН используют металлическую фольгу, уложенную в виде ткани; полупроводниковые и композиционные материалы. Для ПЭН более перспективны композиционные материалы, состоящие из двух и более компонентов. В композиционных ПЭН нагревательные сопротивления изготовляют из графитизированного или металлического материала в виде токопроводящей ткани. Наиболее распространена углеграфитовая ткань УТТ-2 с допустимой температурой на поверхности до 463 К.

2.8.10. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ОБЛУЧЕНИЯ

К электрооборудованию установок электрического освещения и облучения относят лампы, пускорегулирующие аппараты (ПРА), автоматические выключатели и другое оборудование.

Осветительные сети (ОС) должны иметь защиту от токов короткого замыкания (ТКЗ) и в некоторых случаях от токов перегрузки.

Защиту от перегрузки должны иметь осветительные сети: внутри помещений, выполненные открыто проложенными проводами с горючей наружной оболочкой или изоляцией;

в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, а также для бытовых и переносных электроприемников: утюги, чайники, плитки, комнатные холодильники, пылесосы, стиральные и швейные машины и т. д.;

во взрывоопасных и пожароопасных зонах при любых видах проводов и способах проводки.

Осветительные сети защищают с помощью *предохранителей* или *автоматических выключателей* (автоматов), автоматически отключающих защищаемую электрическую сеть при ненормальных режимах.

Для защиты осветительных сетей наибольшее распространение получили автоматические выключатели. Предохранители имеют ограниченное применение ввиду отсутствия производства распределительных пунктов и групповых щитков с предохранителями.

Одно из преимуществ автоматов перед предохранителями — возможность использовать их не только в качестве защитных, но и отключающих аппаратов (аппаратов управления).

Для защиты осветительных сетей следует применять автоматы с расцепителями, имеющими обратно зависимую от тока характеристику. Автоматы, имеющие только электромагнитный мгновенно действующий расцепитель, для осветительных сетей применять не рекомендуется.

Автоматические выключатели, используемые для защиты осветительных сетей, имеют следующие обратно зависимые от тока расцепители:

тепловые нерегулируемые;

комбинированные (тепловые и электромагнитные) нерегулируемые;

комбинированные (тепловые и электромагнитные) регулируемые.

Выбор аппаратов защиты и проводов. Аппараты защиты и провода выбирают исходя из следующих рекомендаций.

1. Защиту электрических сетей от токов короткого замыкания следует осуществлять отключением аварийного участка с наименьшим временем и при соблюдении требования селективности. Такое отключение возможно, если ток короткого замыкания в конце линии при одно- и многофазных коротких замыканиях в сети с глухозаземленной нейтралью и в двух- и трехфазных сетях с

изолированной нейтралью имеет значение не меньше указанного ниже:

при защите предохранителями в невзрывоопасных зонах — $3I_3$, во взрывоопасных — $4I_3$;

при защите автоматами с разделителями, имеющими обратно зависимую от тока характеристику: в невзрывоопасных зонах — $3I_3$; во взрывоопасных зонах — $6I_3$, где I_3 — номинальный ток аппарата защиты: плавкого элемента предохранителя или разделителя автомата.

2. Для обеспечения селективности защиты номинальные токи плавких элементов предохранителей или уставок автоматов каждого последующего по направлению к электроприемнику аппарата защиты следует принимать не менее чем на две ступени ниже предыдущего, если это не приводит к завышению сечения проводов сети. Разница не менее чем на одну ступень обязательна при всех условиях.

3. Номинальные токи уставок автоматов и плавких элементов предохранителей следует выбирать по возможности наименьшими по расчетным токам защищаемых участков сети.

4. При установке автоматов с тепловым и комбинированным расцепителями в шкафах или ящиках при выборе расцепителей по расчетным токам линий указанные в каталогах номинальные токи расцепителей следует понижать на 10 % вследствие того, что температура воздуха в шкафу или ящике может оказаться выше 25°C , т. е. температуры, на которую калиброван тепловой расцепитель. Проверку токов расцепителей на отключение три ТКЗ (п. 1) и на соблюдение соотношений между допустимыми токами (расцепителей производят по указанным в каталогах или на автоматах номинальным токам расцепителей (без понижения на 10 %).

5. Расчетные формулы для выбора защитных аппаратов в осветительных и силовых сетях приведены в таблице 2.17, в которой приняты следующие обозначения:

$I_{п.вс}$ — номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А;

$I_{ном.р}$ — номинальный ток или уставка номинального тока теплового расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой или регулируемой обратно зависимой от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки), А;

$I_{элм.р}$ — номинальное значение тока уставки электромагнитного расцепителя (отсечки), А;

$I_{н.э}$ — номинальный ток электроприемника, А;

$I_{пуск}$ — пусковой ток электроприемника, А;

$I''_{пуск}$ — наибольший пусковой ток одного электроприемника в данной группе. При одновременном запуске группы электродвигателей — суммарный пусковой ток этой группы, А;

$I''_{макс}$ — расчетный ток остальных электроприемников группы, работающих в длительном режиме, А;

2.17. Расчетные формулы для выбора аппаратов защиты в осветительных и силовых сетях

Аппарат защиты	Осветительные сети				Силовые сети	
	Лампы накаливания	Разрядные лампы низкого давления		Разрядные лампы высокого давления ДРЛ, ДРИ, ДНаТ	Линии к одиночным электроприемникам	Линии к группам электроприемников
1	2	3	4	5	6	6
1. Предохранители (тепловая вставка)	$I_{п.вс} \geq I_{макс}$	$I_{п.вс} \geq I_{макс}$	$I_{п.вс} \geq 1,2 I_{макс}$	$I_{п.вс} \geq I_{н.э}$	$I_{п.вс} \geq I_{макс}$	$I_{п.вс} \geq I_{макс}$
2. Автоматический выключатель с теп- ловым расцепите- лем с регулирую- щей и регулирую- щей обратной зави- симой от тока характеристикой	$I_{ном.р} \geq I_{макс}$	$I_{ном.р} \geq I_{макс}$	$I_{ном.р} \geq 1,3 I_{макс}$	$I_{ном.р} \geq 1,25 I_{н.э}$	$I_{п.вс} \geq \frac{I_{пуск}}{\alpha}$	$I_{п.вс} \geq \frac{I_{пуск} + I_{II}}{\alpha}$
3. То же, с комби- нированным рас- цепителем	$I_{ном.р} \geq I_{макс}$ при кратности токовой отсечки не менее 10	$I_{ном.р} \geq I_{макс}$	$I_{ном.р} \geq 1,3 I_{макс}$	$I_{ном.р} \geq 1,25 I_{н.э}$ $I_{элм.р} \geq 1,2 I_{пуск}$	$I_{ном.р} \geq 1,1 I_{макс}$ $I_{элм.р} \geq 1,2 I_{пуск} + I_{II}$	$I_{ном.р} \geq 1,1 I_{макс}$ $I_{элм.р} \geq 1,2 I_{пуск} + I_{II}$

Примечания: 1. Позиция 3, графа 2 — формула дана для автоматических выключателей с кратностью тока отсечки менее 10.

2. Позиция 3, графы 2 и 5 — при уставке автоматического выключателя в шкафу повышающие коэффициенты не вводятся, так как формулы справедливы для температуры среды 40 °С.

3. Позиции 2 и 3, графы 5 и 6 — при уставке автоматических выключателей на линиях к силовым электроприемникам, не имеющим в своем составе электродвигателей, коэффициенты не учитываются.

α — коэффициент, зависящий от условий и длительности пускового периода, равный 2,5, за исключением линий к электродвигателям с длительностью пускового периода более 2...2,5 секунд (крупные вентиляторы с большим маховым моментом и т. д.). В иных случаях принимают $\alpha = 1,6$.

Аппараты защиты. Их *устанавливают* в следующих пунктах осветительной сети:

в местах присоединения сети к источникам питания (распределительные щиты подстанций, распределительные пункты и др.);

на вводе в здание;

на групповых щитках в начале групповых линий;

в местах уменьшения площади сечения проводов по направлению к потребителям энергии;

со стороны высшего напряжения понижающих трансформаторов 12...42 В.

Аппараты защиты в этих случаях должны быть рассчитаны на ток, возможно близкий к номинальному току трансформаторов. При питании отдельными группами от щитков не более трех трансформаторов защиту осуществляют только в начале групповых линий;

со стороны низшего напряжения трансформаторов 12...42 В.

Аппараты защиты в осветительных сетях *не допускается устанавливать* в следующих местах:

при снижении площади сечения по длине линии и на ответвлениях от нее, если защищаемый аппарат линии защищает также участок со сниженным сечением;

в местах ответвлений от линий к электрическим приемникам малой мощности (светильники, бытовые приборы и т. д.), если питающая линия защищена аппаратом с уставкой не более 25 А, без ограничения длины и сечения;

при снижении площади сечения по длине линии на ответвлениях от нее, если сниженная площадь сечения не менее половины площади сечения начального участка линии;

в местах ответвлений от линии к электрическим приемникам малой мощности (светильники, бытовые приборы и т. д.), если линия защищена аппаратами с уставкой выше 25 А, но не более 63 А при длине линии до 3 м при любом способе прокладки и при прокладке в стальной трубе без ограничения длины.

Аппараты защиты следует *устанавливать непосредственно в местах присоединения защищаемых проводов к питающей линии*. Допускается отнесение аппаратов защиты от места ответвления на длину до 6 и 30 м при условии соблюдения требований, указанных в таблице 2.18.

2.18. Условия отнесения аппаратов защиты от мест ответвлений

Длина линии от места ответвления до аппарата защиты	Площадь сечения провода	Способ прокладки	Область применения
До 6 м	Не менее площади сечения провода после аппарата защиты	Для проводов с горючей наружной оболочкой или изоляцией — в стальных трубах, металлорукавах или коробках,	Допускается там, где, безусловно, необходимо
До 30 м	Не менее площади сечения, определяемой расчетным током, но не менее 10 % пропускной способности питающей линии	в остальных случаях (кроме кабельных сооружений пожароопасных и взрывоопасных зон) — открыто по конструкциям при условии защиты проводов от возможных механических повреждений	Допускается для ответвлений, выполняемых в труднодоступных местах, например на большой высоте

Аппараты защиты следует *устанавливать в цепи* следующих проводов:

при защите сетей предохранителями. Последние должны устанавливаться во всех нормально незаземленных полюсах или фазах. Установка предохранителей в нулевых рабочих проводниках разрешается;

при защите сетей с глухозаземленной нейтралью автоматическими выключателями их расцепители должны устанавливаться во всех нормально незаземленных проводах. В однофазных двухпроводных линиях во взрывоопасных зонах класса В-1 расцепители автоматов должны устанавливаться в цепи рабочих и нулевых проводов;

при защите сетей с изолированной нейтралью в трехпроводных сетях трехфазного тока и двухпроводных сетях однофазного или постоянного токов допускается устанавливать расцепители автоматов в двух фазах при трехпроводной сети и в одной фазе (полюсе) — при двухпроводных сетях. При этом в пределах одной и той же электроустановки защиту следует осуществлять в одних и тех же фазах (полюсах).

Устройства компенсации реактивной мощности. В установках наружного освещения светильники с разрядными лампами должны иметь индивидуальную компенсацию реактивной мощности, обеспечивающую коэффициент мощности не ниже 0,85. Допускается групповая компенсация реактивной мощности для прожекторов с разрядными лампами. В этом случае необходимо отключать компенсирующие устройства одновременно с отключением компенсируемых установок.

Для повышения коэффициента мощности в трехфазных осветительных сетях с разрядными лампами высокого давления применяют конденсаторные установки типа УК (табл. 2.19).

2.19. Технические данные некоторых конденсаторных установок

Конденсаторная установка	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, квар	Частота, Гц	Масса, кг
УК 1-0,4-33 1/3 УЗ	0,4	33 1/3	50	38
УК 2-0,4-66 2/3 УЗ	0,4	66 2/3	50	59
УК 3-0,4-100 УЗ	0,4	100	50	87
УК 4-0,4-133 1/3 УЗ	0,4	133 1/3	50	115

Для питания осветительных приборов общего внутреннего и наружного освещения применяют напряжение не выше 220 В переменного или постоянного тока. В помещениях без повышенной опасности напряжение 220 В применяют для всех стационарно установленных осветительных приборов вне зависимости от высоты их установки. Напряжение 380 В для питания осветительных приборов общего внутреннего и наружного освещения можно использовать при соблюдении следующих указаний.

1. Ввод в осветительный прибор и пускорегулирующий аппарат должен быть выполнен проводами или кабелем с изоляцией на напряжение не менее 660 В.

2. Ввод в осветительный прибор двух или трех проводов разных фаз системы 660/380 В не допускается.

В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных при высоте установки светильника общего освещения над полом или площадкой обслуживания менее 2,5 м применение светильников класса защиты 0 запрещается. Необходимо применять светильники класса защиты 2 и 3. Допускается использование светильников класса защиты 1 при условии защиты устройством защитного отключения (УЗО) с током срабатывания до 30 мА.

Установку и чистку светильников сети электрического освещения, смену перегоревших ламп и плавких калиброванных вставок и осмотр сети электрического освещения проводят по графику. Осмотр и проверки сети освещения проводят не реже 1 раза в месяц в дневное время; проверку исправности аварийного освещения при отключенном рабочем освещении — 2 раза в год.

Щитки с предохранителями. Их закрепляют на высоте 2,5...3 м от пола. Если на щитке расположены выключатели и рубильники, то на высоте 1,5...1,7 м. На групповых щитках освещения вместо предохранителей размещают автоматические выключатели, рассчитанные на токи от 6 А и выше. Широко применяют распределительные пункты серии ПР11 и ПР22. Пункты ПР11 на номинальное напряжение 660 В и токи 63, 100, 160, 250, 400 и 630 А имеют от 2 до 12 встраиваемых выключателей. Степень защиты IP21 и IP54. При необходимости использования токов автоматического выключателя более 10 А используют пункты ПР22.

По Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей питание сетей внутреннего, наружного, охранного ос-

вещения должно быть предусмотрено по отдельным линиям. Управление сетью наружного и охранного освещения осуществляют централизованно из помещения щита управления энергохозяйством или из другого специального помещения. Установки наружного (уличного) и рекламного освещения должны включаться и отключаться автоматически в соответствии с графиком, составленным с учетом времени года, особенностей местных условий и утвержденным местными органами власти. Схемы расположения светильников уличного освещения, включаемых по графику ночного режима, необходимо согласовывать с местными органами управления внутренних дел.

Защитные меры безопасности в осветительных сетях. К ним относят защитное заземление металлических корпусов светильников общего освещения с лампами накаливания, люминесцентными, ДРЛ, ДРИ, ДРИЗ, ДНаТ со встроенными внутрь светильника ПРА, которое осуществляют:

в сетях с заземленной нейтралью — присоединением к заземляющему винту РЕ проводника. Заземление корпуса светильника ответвлением от нулевого рабочего проводника внутри светильника запрещается;

в сетях с изолированной нейтралью — присоединением к заземляющему винту светильника защитного проводника.

Металлические отражатели светильников с корпусами из изолирующих материалов заземлять не требуется.

При выполнении защитного заземления осветительных приборов наружного освещения необходимо подключать железобетонные и металлические опоры, тросы к заземлителю в сетях с изолированной нейтралью и к РЕ (PEN) проводнику в сетях с заземленной нейтралью.

Для установок наружного освещения фасадов зданий, монументов и т.п. наружной световой рекламы и указателей в сетях TN-S и TN-C-S рекомендуется установка УЗО с током срабатывания до 30 мА, при этом фоновое значение токов утечки должно быть в 3 раза меньше уставки срабатывания УЗО по дифференциальному току.

2.8.11. МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Энергосбережение — реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых

источников. Для реализации энергосбережения обследуют предприятия с помощью энергоаудита.

Энергоаудит — обследование энергохозяйства промышленного предприятия или организации с целью разработки рекомендаций и технических решений по снижению энергетических затрат. На основании энергоаудита производят *сбор документальной информации* о потреблении энергоресурсов, выпуске продукции, выполнении работ и оказании услуг, о технических параметрах, технико-экономических показателях, климатических наблюдениях и других данных, которые необходимо учитывать при расчете эффективности энергетического объекта. При этом важное место отводят *энергетическому менеджменту* — совокупности технических и организационных средств, направленных на повышение эффективности использования энергоресурсов и являющихся частью общей структуры управления предприятием.

Некоторые типовые объекты энергоаудита и разработанные для них рекомендации по энергосбережению приведены в таблице 2.20.

2.20. Некоторые типовые объекты энергоаудита и рекомендации по энергосбережению для них

Типовые объекты	Возможные рекомендации по энергоснабжению
Электропривод	<p>Увеличение нагрузки рабочих машин. Установка двигателей соответствующей мощности, двигателей повышенной экономичности. Применение контроллеров мягкого пуска, частотно-регулируемого привода, таймеров холостого хода, статических компенсаторов реактивной мощности и фильтров.</p> <p>Примечание: Силовые процессы на предприятиях в основном осуществляются электроприводами. Для данных электроприемников необходимо определить их паспортные данные (тип, номинальное напряжение и номинальную мощность, КПД, коэффициент мощности, режим работы)</p>
Котлы	<p>Настройка режимов котла, применение автоматических регуляторов, теплоизоляция наружных поверхностей, уплотнение клапанов и тракта, забор воздуха из помещений котельной, внедрение непрерывной автоматической продувки, утилизация тепла дымовых газов и продувочной воды, модернизация электропривода насосов, вентиляторов и дымососов.</p> <p>Для котельной — оптимизация графика работы котлов.</p> <p>Примечание: Определить потери тепла в сетях распределения; количество теплоты на технологию; количество теплоты на отопление; количество теплоты на ГВС</p>
Бойлеры, теплообменники	<p>Промывка теплообменника, изоляция трубопроводов и наружных поверхностей.</p> <p>Установка пластинчатых теплообменников</p>
Системы воздухо-снабжения	<p>Сокращение расхода электроэнергии, требуемой для обеспечения предприятий сжатым воздухом: за счет улучшения работы компрессоров в результате регулирования производительности при колебаниях расхода сжатого воздуха; автоматизации открытия всасывающих клапанов; отключения лишних компрессоров</p>

Типовые объекты	Возможные рекомендации по энергоснабжению
Вентиляция, кондиционирование	<p>при снижении расходов сжатого воздуха; снижения номинального рабочего давления компрессорной установки; внедрения в поршневых компрессорах прямооточных клапанов; осуществления резонансного наддува поршневых, воздушных компрессоров; подогрева сжатого воздуха перед пневмоприемниками; замены компрессоров старых конструкций на новые с более высоким КПД; систематического контроля за утечками сжатого воздуха на отдельных участках; систематического устранения неплотностей в сальниках, трубопроводах, соединительной и запорной арматуре; замены там, где это целесообразно, сжатого воздуха другими энергоносителями; замены пневмоинструмента на электроинструмент; устранения утечек, осушения воздуха, оптимизации системы распределения воздуха; установки системы регулирования давления, секционирования компрессоров, межступенчатого охлаждения, ограничения расхода охлаждающей воды; применения тепловых насосов; модернизации электропривода; применения экономичных компрессоров</p> <p>Теплоизоляция трубопроводов, теплообменников и арматуры, устранение утечек.</p> <p>Внедрение центральных и индивидуальных регуляторов, рекуперация вентиляционного тепла. Исключение перегрева и переохлаждения. Включение только тогда, когда в помещении находятся люди или когда идут технологические процессы. Минимизация объемов приточного и отработанного воздуха.</p> <p>Сокращение расхода электроэнергии на вентиляционные установки обеспечивают: за счет замены старых вентиляторов новыми, более экономичными; внедрения экономичных способов регулирования подачи вентиляторов; блокировки вентиляторов тепловых завес с устройствами открывания и закрывания ворот; отключения вентиляционных установок во время обеденных перерывов, пересмен и т. п.; устранения эксплуатационных дефектов и отклонений от проекта; внедрения автоматического управления вентиляционными установками</p>
Освещение	<p>Максимальное использование естественного и местного освещения в сочетании с автоматическим управлением (системы регулирования; детекторы присутствия; таймеры; искусственным освещением; замена ламп накаливания на экономичные лампы); секционирование осветительных сетей.</p> <p>Окраска помещений в светлые тона, регулярная чистка светильников и окон</p>
Водоснабжение, насосные установки	<p>Устранение утечек, применение экономичной арматуры. Использование более дешевой воды (технической, артезианской, оборотной). Применение сухих градирен.</p> <p>Снижение расхода электроэнергии на насосных установках за счет</p> <p>повышения КПД насосов (замены устаревших малопроизводительных насосов насосами с высоким КПД; повышения КПД насосов до паспортных значений);</p> <p>улучшения загрузки насосов и совершенствования регулирования их работы (обеспечения максимальной подачи насоса; регулирования работы насоса напорной или приемной задвижкой; изменения числа работающих насосов; изменения частоты вращения электродвигателя);</p>

Типовые объекты	Возможные рекомендации по энергоснабжению
Холодильные установки	<p>уменьшения сопротивления трубопроводов (ликвидации резких поворотов, неисправностей задвижек, засоренностей всасывающих устройств);</p> <p>сокращения расхода и потерь воды (ликвидации утечек и бесцельного расхода воды; внедрения оборотного водоснабжения; сокращения расхода воды за счет совершенствования систем охлаждения; соблюдения установленного графиком перепада температур между прямой и обратной сетевой водой). Модернизация электропривода насосов</p> <p>Устранение воздуха из хладагента и заполнение системы до нужного уровня, очистка холодных поверхностей.</p> <p>Установка систем регулирования температуры. Теплоизоляция трубопроводов и камер, установка пластиковых штор.</p> <p>Снижение расхода охлаждающей воды и подпитки.</p> <p>Модернизация электропривода компрессоров. Отключение установок, если охлаждение не нужно. Использование выделяющегося тепла. Правильный выбор числа одновременно работающих компрессоров</p>
Здания	<p>Дополнительная изоляция стен и перекрытий, тройное и вакуумное остекление.</p> <p>Модернизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования, освещения и водоснабжения.</p> <p>Установка интегрированных систем управления оборудованием зданий</p>

Приборы учета электрической энергии. Для экономного расходования электрической энергии необходимо правильно эксплуатировать приборы ее учета — счетчики электрической энергии.

Счетчик электрической энергии — прибор, измеряющий активную или реактивную энергию.

Активная мощность, измеряемая счетчиком, Вт:
для однофазного счетчика

$$P_{1\phi} = U_{\phi} I \cos \varphi;$$

для трехфазного двухэлементного счетчика

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} U_{\phi} I \cos \varphi;$$

для трехфазного трехэлементного счетчика в четырехпроводной сети

$$P_{3\phi 4} = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3.$$

Реактивная мощность, измеряемая счетчиком реактивной энергии, вар,

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} U_{\phi} I \sin \varphi.$$

Реактивная мощность линий и трансформаторов уменьшает пропускную способность сети и не позволяет полностью использовать установленную мощность генератора. Реактивная мощность циркулирует в единицу времени между генератором и магнитным полем приемника (трансформатора, электродвигателя), создавая периодический (колебательный) обмен энергии без преобразования ее в тепловую, механическую или иную.

Для многих счетчиков важен *порядок чередования фаз напряжений*, который может быть прямым или обратным. Его определяют по фазоуказателю И517М или прибору ВАФ-85 на колодке зажимов счетчика. Прямой порядок чередования фаз напряжений — АВС, ВСА, САВ. Обратный порядок чередования фаз напряжений — АСВ, СВА, ВАС — создает дополнительную погрешность и вызывает самоход индукционного счетчика активной энергии. Диск счетчика реактивной энергии при обратном порядке чередования фаз напряжений и нагрузки вращается в обратную сторону.

Параметры, характеризующие работу счетчика. *Класс точности счетчика* — число, равное пределу допускаемой погрешности, выраженной в процентах, для всех значений диапазона измерений тока от минимального до максимального значения при коэффициенте мощности, равном единице, и нормальных условиях, установленных стандартами или техническими условиями на счетчик. Класс точности обозначают цифрой в круге на шитке счетчика.

Самоход счетчика — движение диска или мигание индикаторов счетчика под действием приложенного напряжения и при отсутствии тока в последовательных цепях.

Порог чувствительности счетчика — наименьшее нормируемое значение тока, которое вызывает изменение показаний счетного механизма при номинальных значениях напряжения, частоты и $\cos \varphi = 1$.

Полярность трансформатора тока (ТТ) счетчика. Однополярными жазимами измерительных трансформаторов называют зажимы первичной и вторичной обмоток, намотанных на сердечник (кern) в одном направлении. Обратная полярность — изменение направления тока в первичной или вторичной обмотках ТТ. Изменение направления тока в токовой цепи измерительного элемента счетчика равноценно изменению угла фазового сдвига на 180° , что вызывает отрицательный вращающий момент.

Электронный счетчик. Для измерений электроэнергии переменного тока применяют *индукционные и электронные счетчики*.

Измеряемая активная энергия, кВт·ч, в общем виде

$$W = Pt.$$

Измерения энергии электронными счетчиками основаны на преобразовании аналоговых входных сигналов переменного тока и напряжения в счетный импульс или код.

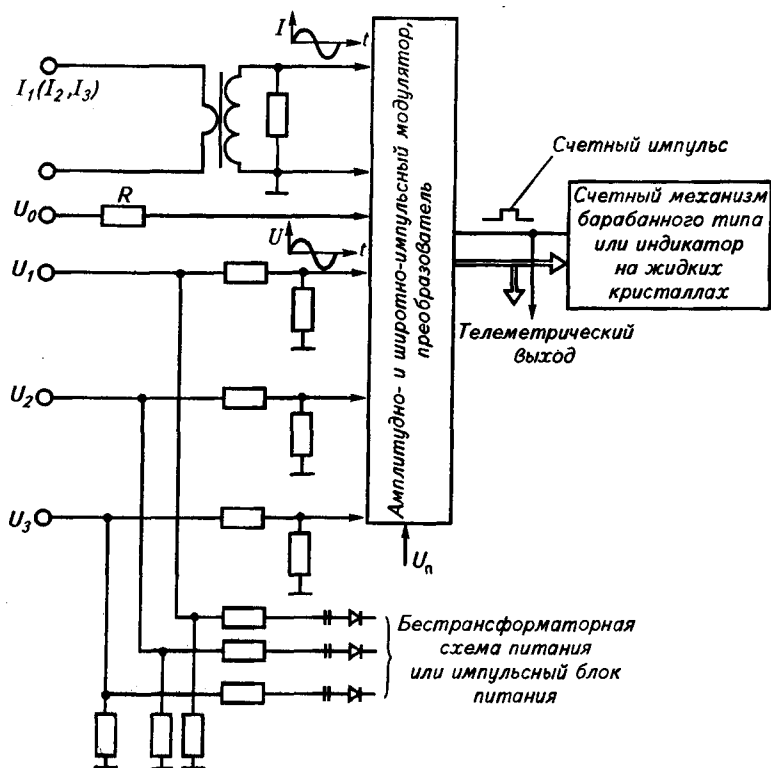


Рис. 2.105. Структурная схема электронного счетчика

На рисунке 2.105 представлена структурная схема электронного счетчика, основанного на амплитудной и широтно-импульсной модуляции.

В электронном счетчике отсутствуют механические вращающиеся части, тем самым исключается трение. В результате удается добиться лучших метрологических характеристик: погрешности измерений, порога чувствительности, самохода счетчика и т. д.

В ряде электронных счетчиков вместо счетного механизма барабанного типа применяют индикатор на жидких кристаллах. Использование больших интегральных схем (БИС), микропроцессоров позволило создать многофункциональные счетчики. Они измеряют активную и реактивную энергию, а также ток, напряжение, $\cos \varphi$, контролируют и запоминают графики нагрузок, отображают на индикаторе информацию о схеме включения счетчика и др. Выпускаемые электронные счетчики не в полной мере удовлетворяют требованиям эксплуатации, таким как: надежность

и пылевлагонепроницаемость корпуса; надежность электронных элементов схемы и качество сборки счетчиков; защищенность от коммутационных и грозовых перенапряжений, особенно в распределительных сетях напряжением 380/220 В; защищенность от несанкционированного доступа и изменения схемы включения счетчика.

Точность измерений электрической энергии счетчиком можно оценить *погрешностью* счетчика, которая определяется его систематической составляющей, порогом чувствительности, самоходом, точностью регулировки внутреннего угла, дополнительными погрешностями.

Погрешность счетчика δ_c зависит от значений тока и $\cos \varphi$. Зависимость погрешности от тока и $\cos \varphi$ называют нагрузочной характеристикой счетчика.

Схемы включения однофазных счетчиков. Для измерений электрической энергии в однофазных сетях переменного тока применяют различные типы счетчиков как отечественного, так и зарубежного производства.

Схема включения однофазного счетчика изображена на рисунке 2.106. Обязательное требование при включении счетчика — соблюдение полярности подключения как по току, так и по напряжению. Кроме того, кожух счетчика выполняется прозрачным.

На заводах-изготовителях счетчиков с целью предотвращения хищений электрической энергии предусматривают установку на однофазных индукционных счетчиках:

стопора обратного хода;

второй (дублирующей) перемычки для подачи напряжения на катушку, располагая ее внутри корпуса;

второй токовой катушки в цепи нулевого провода.

Схемы включения трехфазных счетчиков. В трехфазной сети 380/220 В применяют счетчики *прямого включения* (прямоточные) и счетчики, подключаемые через трансформаторы тока (ТТ). Их называют *универсальными*, или *трансформаторными*.

Счетчики прямого включения рассчитаны на номинальные токи 5, 10, 20, 50 А. Их подключают к сети последовательно с сетевым напряжением при обязательном соблюдении полярности.

Для измерений активной и реактивной энергии применяют схему включения счетчиков, показанную на рисунке 2.107.

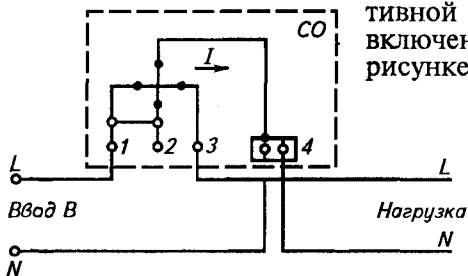


Рис. 2.106. Схема включения счетчика типа СО-ЭЭ6705

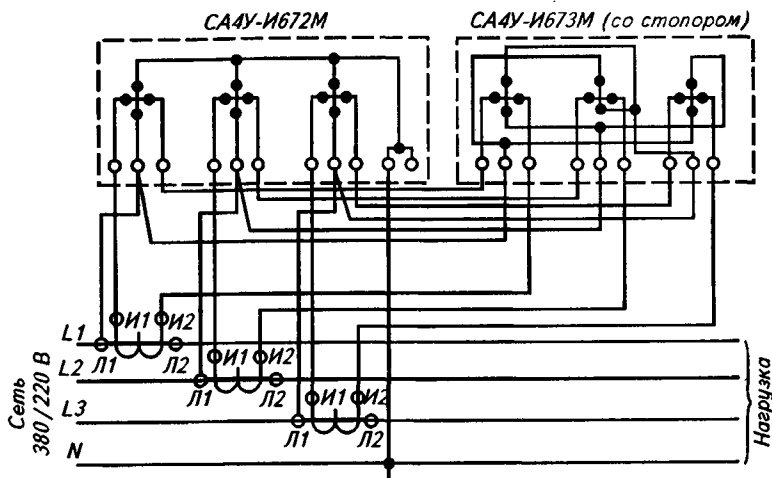


Рис. 2.107. Схема включения счетчиков для измерений активной и реактивной энергии в сети напряжением 380/220 В

Схемы включения счетчика реактивной энергии типа СР4У-И673 и счетчика активной энергии не отличаются друг от друга. Токовые цепи этих счетчиков соединяют последовательно. Цепи напряжения счетчиков подключают параллельно. Отличие счетчика реактивной энергии от счетчика активной энергии — в схеме внутренних соединений. За счет схемы внутренних соединений катушек, рассчитанных на напряжение 380 В, выполняется дополнительный 90°-ный фазовый сдвиг между магнитными потоками.

Проверка схем включения трехфазных счетчиков в электроустановках напряжением 380/220 В. Проверку осуществляют для того, чтобы убедиться, что на данном присоединении измерена вся потребляемая электроэнергия.

Активную мощность, Вт, и реактивную мощность, вар, измеряемые индукционным и электронным счетчиками с помощью секундомера, рассчитывают по формуле

$$P = 3600n/(At),$$

где n — количество оборотов (импульсов), отсчитываемое за время t , с; A — передаточное число счетчика, указываемое на его щитке.

Количество оборотов отсчитывают:

у индукционного счетчика — при прохождении метки на диске счетчика;

у электронного — по миганию (свечению) светодиодного индикатора телеметрического выхода.

Измерение мощности, подводимой к счетчику. Измерения тока в токовых цепях счетчика выполняют с помощью токоизмерительных клещей в диапазонах от 25 мА до 5 А, от 5 до 500 А.

Зная значения напряжения, тока и $\cos \varphi$ вычисляют мощность, подводимую к счетчику:

для однофазного счетчика

$$P_{\text{сч}} = U_{\text{ф}} I \cos \varphi,$$

для трехфазного счетчика

$$P_{\text{сч}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} I_{\text{ср}} \cos \varphi.$$

Сравнивая значения мощности, подводимой к счетчику, и измеренной им, можно ориентировочно оценить правильность схемы включения в работу счетчика.

Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите о назначении электрических нагревателей сопротивлением, области их применения. 2. Охарактеризуйте открытые электрические нагреватели. Укажите их достоинства, недостатки, область применения. 3. Охарактеризуйте трубчатые электрические нагреватели. Укажите их достоинства, недостатки, область применения. 4. Для чего предназначены устройства компенсации реактивной мощности? Перечислите требования к подключению конденсаторных батарей. 5. Перечислите меры безопасности в осветительных сетях. 6. Расскажите о назначении энергосбережения. 7. Расскажите о назначении энергоаудита. Как его осуществляют? 8. Перечислите приборы учета электрической энергии. 9. Перечислите параметры, характеризующие работу счетчиков. Поясните их.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бородин И. Ф., Судник Ю. А.** Автоматизация технологических процессов. — М.: КолосС, 2003. — 334 с.
2. **Бочаров В. В., Гаврилов С. М., Тюлькин В. Н.** Рекомендуемые материалы для ответственного за электрохозяйство предприятия, организации, учреждения. — С-Пб.: Центр охраны труда, промышленной безопасности и социального партнерства, 2000. — 65 с.
3. **Ерофеев А. А.** Теория автоматического управления. — С-Пб.: Политехника, 2002. — 302 с.
4. **Загинайлов В. И., Шеповалова Л. Н.** Основы автоматики. — М.: Колос, 2001. — 200 с.
5. **Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках.** — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 112 с.
6. **Коломиец А. П., Потапов В. А., Кондратьева Н. П., Владыкин И. Р.** Электробезопасность на предприятиях. — Ижевск: РИО «Шеп», 2003. — 148 с.
7. **Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации: каталог продукции 2003 г.** — М.: Овен, 2003. — 152 с.
8. **Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.** — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 192 с.
9. **Мельников А. А.** Теория автоматического управления техническими объектами автомобилей и тракторов. — М.: Изд. центр «Академия», 2003. — 280 с.
10. **Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.** — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 208 с.
11. **Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок.** — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 304 с.
12. **Правила устройств электроустановок (ПУЭ), издание седьмое, раздел 1** (главы 1.1; 1.2; 1.7; 1.9), раздел 7 (главы 7.5; 7.6; 7.10). — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 176 с.
13. **Правила устройств электроустановок (ПУЭ), издание седьмое, раздел 6, раздел 7** (главы 7.1; 7.2). — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 80 с.
14. **Устройство, ремонт и обслуживание электрооборудования в сельскохозяйственном производстве / А. П. Коломиец, Г. П. Ерошенко, Н. П. Кондратьева, И. Р. Владыкин, С. И. Юран и др.** — М.: Изд. центр «Академия», 2003. — 368 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	3
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
1.2. ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	5
1.3. ПОНЯТИЕ О МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ	5
1.3.1. Механические характеристики производственных механизмов	6
1.3.2. Естественные и искусственные механические характеристики электрических двигателей	8
1.3.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока параллельного возбуждения	8
1.3.4. Построение механических характеристик двигателя параллельного возбуждения по каталожным данным	10
1.3.5. Механические характеристики двигателей постоянного тока параллельного возбуждения в двигательном и тормозных режимах	11
1.3.6. Исполнение асинхронного двигателя и построение его механических характеристик по каталожным данным	14
1.3.7. Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя в двигательных режимах	19
1.3.8. Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах	21
1.3.9. Механические характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Синхронный электродвигатель	22
1.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	24
1.4.1. Основные показатели регулирования угловой скорости электроприводов	24
1.4.2. Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	26
1.4.3. Регулирование угловой скорости асинхронного двигателя	27
1.4.4. Регулирование угловой скорости асинхронного электродвигателя изменением числа пар полюсов	30
1.5. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	34
1.5.1. Моменты и силы, действующие в электроприводе	35
1.5.2. Время переходных процессов	36
1.5.3. Время пуска и торможения электропривода	36
1.6. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	38
1.6.1. Нагрев и охлаждение электродвигателей	39
1.6.2. Классификация режимов работы электроприводов	43
1.6.3. Методы определения мощности электродвигателя для различных режимов работы	47

1.6.4. Общая методика выбора электроприводов.....	58
1.7. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	61
1.7.1. Аппаратура неавтоматического исполнения (рубильники, переключатели, ручные пускатели и кнопки управления)	61
1.7.2. Аппаратура автоматического управления	61
1.7.3. Защитная аппаратура, устройство защитного отключения (УЗО)	66
1.7.4. Релейно-контактная аппаратура	79
1.7.5. Бесконтактная аппаратура управления и защиты	82
1.8. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ РАЗОМКНУТЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ	87
1.8.1. Общие сведения	87
1.8.2. Типовые узлы схемы разомкнутых систем управления электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями	87
1.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ И ОБЛУЧЕНИЕ	91
1.9.1. Воздействие оптического излучения на биологические объекты	91
1.9.2. Назначение осветительных и облучательных установок	92
1.9.3. Источники излучения (источники света)	94
1.9.4. Электроосветительная и облучательная арматура	100
1.9.5. Виды и системы освещения	102
1.9.6. Методы расчета освещения	103
1.10. СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ, ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	107
1.10.1. Классификация электронагревательных установок	108
1.10.2. Электрическое сопротивление проводников первого рода	110
1.10.3. Основы электроконтактного нагрева	111
1.10.4. Электроконтактная сварка	113
1.10.5. Основы электродного нагрева	114
1.10.6. Тепловой и электрический расчеты нагревателей	120
1.10.7. Приближенные методы расчета нагревателей	127
1.10.8. Нагревательные провода и кабели	132
1.11. СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ	133
1.11.1. Типы систем заземления и их обозначения	133
1.11.2. Зануление и заземление	135
2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКО- ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МАШИН	138
2.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	138
2.1.1. Понятие об автоматизации технологических процессов	138
2.1.2. Структурная и функциональная схемы систем автоматики	140
2.1.3. Классификация САУ	142
2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИКИ	144
2.2.1. Описание элементов и систем автоматики в статическом режиме	145
2.2.2. Описание элементов и систем автоматики в динамическом режиме ..	146
2.2.3. Типовые динамические звенья САУ	152
2.2.4. Соединение динамических звеньев САУ	158
2.2.5. Параметры и характеристики объектов управления	160
2.2.6. Экспериментальные методы определения статических и динамических характеристик	167
2.3. АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ	170
2.3.1. Устойчивость САУ	170
2.3.2. Оценка качества процесса регулирования САУ	176
2.4. СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В САУ	181
2.4.1. Механические преобразователи	183

2.4.2. Электромеханические преобразователи	184
2.4.3. Тепловые преобразователи	188
2.4.4. Электрохимические преобразователи	192
2.4.5. Оптические измерительные преобразователи	193
2.4.6. Элементная база усилительных устройств	194
2.4.7. Усилительные устройства	197
2.5. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	201
2.6. ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ	202
2.7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ	204
2.7.1. Классификация автоматических регуляторов	204
2.7.2. Законы регулирования	205
2.7.3. Позиционные (релейные) автоматические регуляторы	212
2.7.4. Автоматические регуляторы непрерывного и импульсного действия	217
2.7.5. Выбор и расчет автоматических регуляторов	226
2.8. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	233
2.8.1. Электрооборудование и автоматизация установок для послеуборочной обработки зерна	234
2.8.2. Электрооборудование и автоматизация машин и механизмов для приготовления и раздачи кормов, уборки навоза, доильных установок и установок первичной обработки молока	240
2.8.3. Электрооборудование и автоматизация технологических процессов в тепличном хозяйстве	264
2.8.4. Электрооборудование и автоматизация систем обеспечения микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях, в сооружениях защищенного грунта	266
2.8.5. Управление освещением птичников	279
2.8.6. Требования к электроприводу поточных линий. Электропривод поточных линий зерноочистительно-сушильных пунктов и комплексов	280
2.8.7. Электрооборудование и автоматизация холодного и горячего водоснабжения	282
2.8.8. Электрооборудование и автоматизация ремонтного производства подъемно-транспортных средств, сварочных и наплавочных установок, металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станков, стенов для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания	296
2.8.9. Электротермическое оборудование для тепловой обработки сельскохозяйственных материалов	304
2.8.10. Электрооборудование установок электрического освещения и облучения	309
2.8.11. Методы, средства и установки для рационального использования электрической энергии и энергосбережения в технологических процессах сельскохозяйственного производства	316
Литература	325

227p-16a