Библиотека электромонтера

Ш. М. Марголин

Точная остановка электроприводов

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

С1210242

6П2.12
М253

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 153

Ш. М. МАРГОЛИН

ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Большам Я. М., Васильев А. А., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А., Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

УДК 621.34:62-596
М25

В брошюре рассматриваются способы получения точной остановки электроприводов переменного и постоянного тока. Описаны методы расчета неточности остановки, выбор мест установки конечных выключателей.

Большое внимание уделено различным способам получения пониженной скорости электродвигателей, используемым в схемах точной остановки.

Брошюра предназначена для квалифицированных электромонтеров и мастеров промышленных предприятий, занимающихся наладкой и эксплуатацией систем автоматизированного электропривода.

с. 1210242

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Способы повышения точности остановки электропривода . . 4
2. Командоаппараты и конечные выключатели. Погрешности срабатывания аппаратов 14
3. Правильный выбор мест установки конечных выключателей, формы и длины переключающего упора 23
4. Бесконтактные датчики положения механизмов 29
5. Способы получения пониженной скорости вращения трехфазных асинхронных электродвигателей 37
6. Конденсаторное торможение асинхронных электродвигателей 68
7. Точная остановка электроприводов постоянного тока 76
Приложения 80
Литература

Марголин Шарль Моисеевич. **Точная остановка электроприводов.** М.—Л., издательство „Энергия", 1965, 92 с. с черт. (Б-ка электромонтера. Вып. 153)
Тематический план 1965 г., № 170

Редактор *И. П. Шумиловская* Техн. редактор *В. Н. Малькова*

Сдано в набор 28/X 1964 г. Подписано к печати 29/XII 1964 г.
Т-17098 Бумага 84×108¹/₃₂ Печ. л. 4,51 Уч.-изд. л. 4,58
Тираж 13 500 экз. Цена 16 коп. Заказ 1636

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

Государственная публичная
библиотека
им. В. Г. Белинского
г. Свердловск

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с историческими решениями XXII съезда КПСС в нашей стране широко осуществляются механизация и автоматизация производства. Непрерывно увеличивается общее количество электродвигателей, работающих в промышленности. Автоматизация вызывает необходимость точной отработки каждым механизмом заданного пути перемещения. Неточная остановка электропривода может явиться серьезным препятствием к созданию автоматической линии, к автоматизации работы отдельного механизма.

При ручном (дистанционном или местном) управлении для остановки механизма в заданном положении часто приходится многократно включать механизм, что ведет к потере времени, повышенному нагреву двигателя и преждевременному износу оборудования.

Переход к автоматической точной остановке обеспечивает повышение производительности механизмов благодаря торможению за минимально возможное время, увеличение срока службы механизмов, электродвигателей и аппаратуры, уменьшение нагрева. Точная остановка механизмов станка обеспечивает повышение точности обработки изделий.

Имеется большое число производственных механизмов, которые вообще не могут работать автоматически без точной остановки в заданных положениях. К таким механизмам относятся различного типа и назначения подъемники и лифты, некоторые узлы станков (например, шпиндель с борштангой на расточных станках), всевозможные кран-балки и передаточные тележки, несущие на себе рельсовые пути, которые должны при ос-

тановке точно совпадать со стационарными рельсами, и др.

Точная остановка широко применяется на вспомогательных механизмах прокатных станов, на автоматических технологических линиях, на различных перекладчиках и других грузоподъемных механизмах и т. д.

Неточность остановки механизма измеряется величиной его максимального отклонения от заданного положения. Неточность остановки зависит от большого числа факторов — от погрешности конечных или путевых выключателей, релейно-контакторной аппаратуры, от изменений момента тормоза и момента нагрузки, от колебаний напряжения и частоты питающей сети и т. д.

Правильный выбор типа конечных выключателей, мест их установки, формы и длины переключающих упоров, способа снижения скорости для повышения точности остановки — таковы главные задачи, которые часто приходится решать работникам электрохозяйства заводов при наладке и эксплуатации схем автоматического управления механизмами, при автоматизации технологических процессов.

В настоящей брошюре подробно рассмотрены способы практического осуществления остановки электроприводов с заданной точностью.

1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА[1]

В процессе торможения механизм (и соответственно вал электродвигателя) проходит некоторый путь, величина которого не является постоянной, что и приводит к неточности остановки электропривода.

Рассмотрим, из чего складывается путь механизма от заданного момента срабатывания путевого или конечного выключателя до полной остановки. Так как механизм может совершать различные виды движения (поступательное, вращательное и др.), удобнее рассматривать угловой путь вала двигателя (в оборотах или градусах), а затем путем пересчета находить путь ме-

---

[1] Необходимые понятия и формулы — см. приложение 1 и [Л. 9].

514—2

ханизма. Угол поворота вала двигателя $\varphi_т$ на участке торможения состоит из трех слагаемых:

$$\varphi_т = \varphi'_т + \varphi''_т + \varphi'''_т. \quad (1)$$

Первое слагаемое $\varphi'_т$ — это угол поворота вала двигателя от заданного момента срабатывания выключателя до его действительного переключения. Этот угол определяется погрешностью вращающегося командоаппарата или конечного выключателя. Характеристика путевых и конечных выключателей с точки зрения неточности их работы дана в § 2.

Второе слагаемое $\varphi''_т$ равно углу поворота вала за время срабатывания электроаппаратуры (реле, контакторов и т. п.), включающей торможение электродвигателя. Величина $\varphi''_т$, как и $\varphi'_т$, не является постоянной и зависит от изменения скорости вращения вала двигателя и погрешностей времени срабатывания электроаппаратуры. Скорость двигателя может меняться при изменении величины статического момента нагрузки, напряжения или частоты питающей сети, от нагрева обмоток двигателя. Время срабатывания аппаратуры в свою очередь не является постоянной величиной и зависит от температуры, напряжения, влажности и т. п.

Средняя погрешность времени срабатывания контакторов составляет 10% времени срабатывания. Время включения крупных контакторов постоянного тока достигает 0,25—0,3 *сек*, контакторов 1-й величины — 0,1 *сек*, реле РЭ 100—0,04—0,07 *сек*. Контакторы переменного тока являются более быстродействующими аппаратами, чем контакторы постоянного тока, — время их включения равно 0,05—0,07 *сек*. Время размыкания контакта обычно составляет 20—95% времени замыкания.

Третье слагаемое $\varphi''_т$ равно угловому пути вала двигателя за время снижения скорости в процессе торможения. Путь торможения прямо пропорционален запасенной движущимися частями кинетической энергии и обратно пропорционален тормозному моменту на валу двигателя. Как и две предыдущие, составляющая $\varphi''_т$ не является постоянной и зависит от ряда переменных величин — от квадрата скорости двигателя, момента инерции движущихся частей, тормозного и статического моментов, трения.

Рассмотрим более подробно расчет величины пути вала двигателя в процессе остановки и определение неточности остановки:

1) $$\varphi'_{т} = \frac{2\delta i}{360} = \frac{\delta i}{180} \qquad (2)$$

(здесь и ниже углы $\varphi_т$ будем определять в оборотах вала двигателя),

где δ — погрешность командоаппарата, *град*,

i — передаточное число от вала двигателя к барабану командоаппарата.

Если используется конечный выключатель, то его погрешность нетрудно перевести в угол поворота вала двигателя:

2) $$\varphi''_{т} = \frac{n_{нач} t_а}{60}, \qquad (3)$$

где $n_{нач}$ — скорость механизма в момент начала торможения, *об/мин*;

$t_а$ — время срабатывания аппаратуры, *сек*.

3) $$\varphi'''_{т} = \frac{J' n^2_{нач}}{1\,140(M_т + M_с)}, \qquad (4)$$

где J' — суммарный приведенный момент инерции движущихся частей привода, *кгм²* (расчет см. ниже);

$M_т + M_с$ — приведенные к валу двигателя тормозной и статический моменты, *н·м*. Формула для $\varphi'''_{т}$ справедлива, если моменты $M_т$ и $M_с$ неизменны в процессе торможения (см. приложение 1).

Обозначив сумму моментов $M_т + M_с$ как $M_{дин}$ — динамический момент, получим:

$$\varphi'''_{т} = \frac{J' n^2_{нач}}{1\,140 M_{дин}}. \qquad (4а)$$

Таким образом, угол $\varphi_т$ равен:

$$\varphi_т = \frac{\delta i}{180} + \frac{n_{нач} t_а}{60} + \frac{J' n^2_{нач}}{1\,140 M_{дин}}. \qquad (5)$$

Обозначим максимальный и минимальный углы торможения через $\varphi_{т.макс}$ и $\varphi_{т.мин}$ (рис. 1).

Среднее значение угла торможения

$$\varphi_{т.ср} = \frac{\varphi_{т.макс} + \varphi_{т.мин}}{2}. \qquad (6)$$

Максимальное отклонение от заданного положения (или неточность остановки), очевидно, равно:

$$\Delta\varphi_{т.макс} = \pm \frac{\varphi_{т.макс} - \varphi_{т.мин}}{2}. \qquad (7)$$

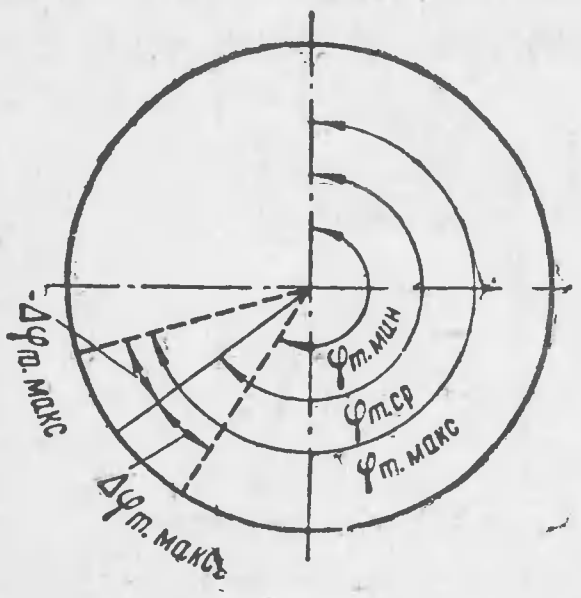


Рис. 1. Диаграмма углов торможения вала привода.

Максимальные и минимальные значения переменных величин $n_{нач}$, J', $M_т$, $M_с$ можно представить в виде алгебраической суммы среднего значения и максимального отклонения:

$$n_{нач} = n_{ср} \pm \Delta n,\ t_а = t_{а.ср} \pm \Delta t \text{ и т. д.}$$

Подставив эти значения в равенство (5), найдем $\varphi_{т.макс}$ и $\varphi_{т.мин}$, а затем и искомую величину неточности остановки $\Delta\varphi_{т.макс}$. Учтем также, что угол $\varphi'_т$ меняется от $\varphi'_{т.мин} = 0$ до $\varphi'_{т.макс} = \frac{\delta i}{180}$ т. е. максимальное отклонение равно:

$$\Delta\varphi'_т = \frac{\varphi'_{т.макс}}{2} = \frac{\delta i}{360}.$$

В результате получим следующую приближенную формулу для вычисления максимальной неточности остановки:

$$\Delta\varphi_{т.макс} = \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{ср} t_{а.ср}}{60}\left(\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta t}{t_{а.ср}}\right) + \\ + \frac{J'_{ср} n^2_{ср}}{1\,140 M_{дин.ср}}\left(2\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta J'}{J'_{ср}} + \frac{\Delta M}{M_{дин.ср}}\right), \qquad (8)$$

или, обозначив величины перед скобками как $\varphi''_{т.ср}$ и $\varphi'''_{т.ср}$:

$$\Delta\varphi_{т.макс} = \frac{\varphi'_{т.макс}}{2} + \varphi''_{т.ср}\left(\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta t}{t_{а.ср}}\right) + \\ + \varphi'''_{т.ср}\left(2\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta J'}{J'_{ср}} + \frac{\Delta M}{M_{дин.ср}}\right). \quad (9)$$

Как видно из формул, для повышения точности остановки очень важно, чтобы торможение начиналось с воз-

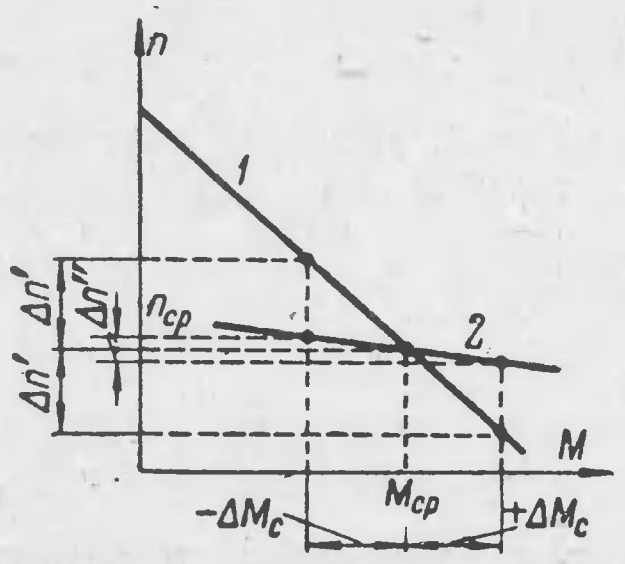


Рис. 2. Жесткая и мягкая механические характеристики.

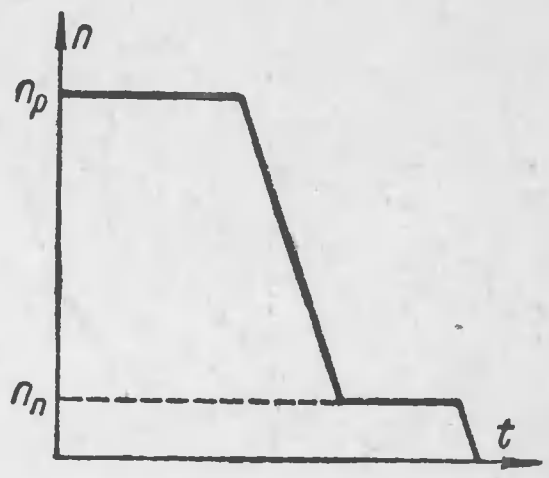


Рис. 3. График изменения скорости при точной остановке электродвигателя. $n_р$ — рабочая скорость; $n_п$ — пониженная скорость.

можно более низкой начальной скорости вращения $n_{нач}$. С уменьшением скорости падает $\varphi''_{т.ср}$, и особенно сильно $\varphi'''_{т.ср}$.

Нужно стремиться к сокращению пути торможения, уменьшению времени срабатывания аппаратуры. Точность остановки повышается с ростом тормозного момента $M_{дин}$, с уменьшением момента инерции J', уменьшением погрешности путевого выключателя δ. Необходимо также стремиться к уменьшению отклонения переменных от их среднего значения. Так, например, если механическая характеристика двигателя является жесткой (см. приложение 1), то при колебаниях нагрузки отклонения скорости $\Delta n'$ малы (см. рис. 2, где показано, как сильно при одном и том же отклонении статического момента ΔM_c изменяется величина скорости $\Delta n'$ на мягкой характеристике *1* и как мало $\Delta n''$ на жесткой характеристике *2*). В схемах точной остановки мягкие характеристики, как правило, не используются.

Наиболее эффективным средством повышения точности остановки является уменьшение начальной скорости торможения $n_{нач}$. На практике это достигается предварительным переводом двигателя на пониженную («ползучую») скорость вращения (рис. 3). После выхода двигателя на пониженную скорость по команде датчика точной остановки производится окончательное торможение.

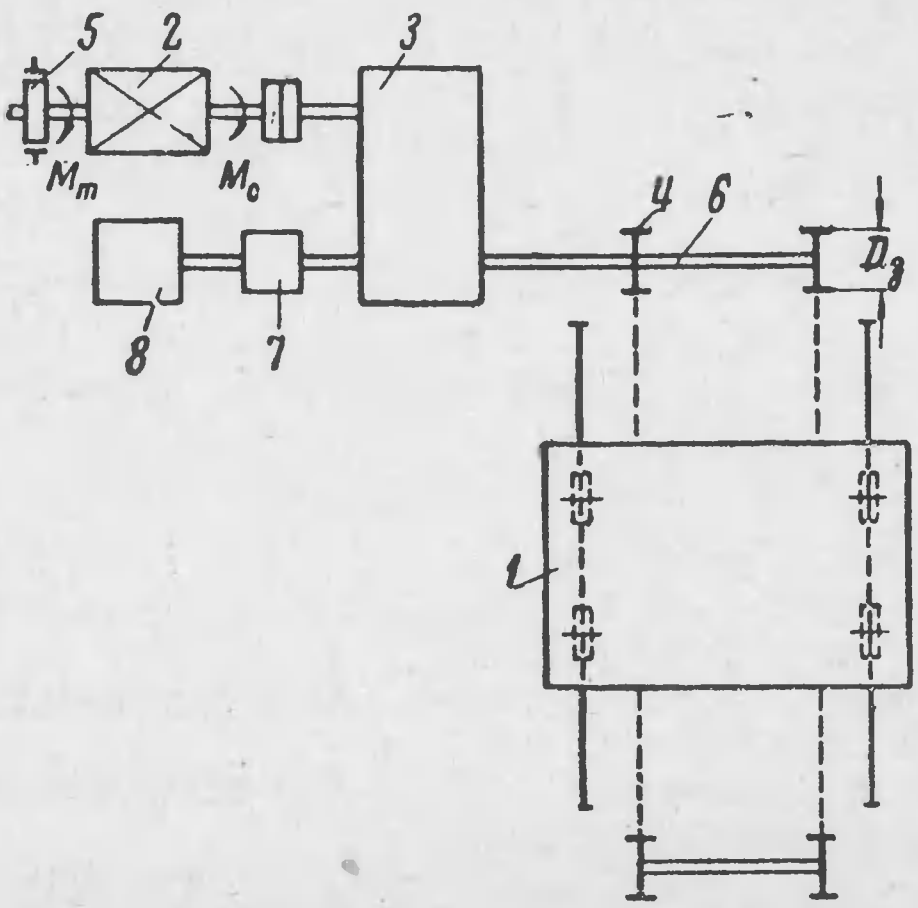


Рис. 4. Кинематическая схема привода тележки.

Необходимая пониженная скорость может быть найдена опытным путем. Однако с помощью приведенных выше и в приложении 1 формул можно заранее, до выбора схемы, определить величину пониженной скорости по заданной неточности остановки. Рассмотрим пример такого расчета.

Пример. 1. Выбор пониженной скорости вращения двигателя для получения заданной точности остановки. Найти неточность остановки тележки при торможении с полной рабочей скорости и выбрать величину пониженной скорости для получения заданной точности. Расчет ведем в международной системе единиц СИ.

Кинематическая схема приведена на рис. 4. Тележка *1* приводится двигателем *2* через редуктор *3* и цепную передачу *4*. На валу двигателя установлен тормоз *5*. С выходным валом *6* через кинематический редуктор *7* связан командоаппарат *8*.

Исходные данные

Ход тележки	$L = 7$ *м*
Требуемая точность остановки	$\Delta s_{т.макс} = \pm 25$ *мм*
Масса тележки	$m_т = 3\,000$ *кг*
Максимальная и минимальная масса груза	$m_{макс} = 15\,000$ *кг*; $m_{мин} = 5\,000$ *кг*
Скорость перемещения тележки	$v = 0{,}6$ *м/сек*
Диаметр звездочки	$D_з = 0{,}4$ *м*

Тип двигателя	МТК 112-6
Номинальная мощность	$P_н = 5$ *квт*
Номинальная скорость	$n_н = 890$ *об/мин*
Номинальный момент	$M_н = \frac{9\,550 P_н}{n_н} = \frac{9\,550 \cdot 5}{890} = 53{,}7$ *н·м*
Маховой момент ротора	$GD^2_д = 0{,}26$ *кГм²*
Тип тормоза	ТКП 200/100
Момент тормоза	$M_т = 50$ *н·м*

Передаточное число редуктора	$i_р = 31{,}5$
К. п. д. редуктора	$\eta_р = 0{,}95$
Суммарное среднее время работы аппаратуры	$t_{а.ср} = 0{,}2$ *сек*
Относительное отклонение времени работы аппаратуры	$\Delta t / t_{а.ср} = 0{,}15$
Погрешность командоаппарата КА4658	$\delta = \pm 0{,}5°$

1. Найдем передаточное число кинематического редуктора *7*. Кинематический редуктор выбирается из условия получения максимально возможного угла поворота барабана командоаппарата 330° при полном ходе тележки (см. § 2). Угол поворота вала *6* при ходе тележки на *7 м*

$$\varphi = \frac{L}{\pi D_з} = \frac{7}{3{,}14 \cdot 0{,}4} = 5{,}57 \text{ оборота.}$$

Передаточное число кинематического редуктора

$$i_{к.р} = \frac{5{,}57}{\frac{330}{360}} = 6{,}08.$$

Общее передаточное число от двигателя к командоаппарату

$$i_{общ} = i_р \cdot i_{кр} = 31{,}5 \cdot 6{,}08 = 191.$$

2. Статический момент нагрузки. Для тележек обычно принимается сопротивление движению F, равное 1,5% веса.

Максимальное сопротивление движению

$$F_{\text{макс}} = 0{,}015\ (m_{\text{т}} + m_{\text{макс}})\ g = 0{,}015\ (3\,000 + 15\,000)\ 9{,}81 = 2\,650\ н$$

($g = 9{,}81\ м/сек^2$ — ускорение силы тяжести).

Минимальное сопротивление

$$F_{\text{мин}} = 0{,}015\ (3\,000 + 5\,000)\ 9{,}81 = 1\,180\ н.$$

Максимальный статический момент на валу двигателя

$$M_{\text{с.макс}} = \frac{F_{\text{макс}} D_{\text{з}}}{2 i_{\text{р}} \eta_{\text{р}}} = \frac{2\,650 \cdot 0{,}4}{2 \cdot 31{,}5 \cdot 0{,}95} = 17{,}7\ н \cdot м.$$

Минимальный статический момент

$$M_{\text{с.мин}} = \frac{F_{\text{мин}} D_{\text{з}}}{2 i_{\text{р}} \eta_{\text{р}}} = \frac{1\,180 \cdot 0{,}4}{2 \cdot 31{,}5 \cdot 0{,}95} = 7{,}88\ н \cdot м.$$

Среднее значение статического момента

$$M_{\text{с.ср}} = \frac{M_{\text{с.макс}} + M_{\text{с.мин}}}{2} = \frac{17{,}7 + 7{,}88}{2} = 12{,}8\ н \cdot м.$$

3. Среднее значение динамического момента

$$M_{\text{дин.ср}} = M_{\text{т}} + M_{\text{с.ср}} = 50 + 12{,}8 = 62{,}8\ н \cdot м.$$

Максимальный динамический момент

$$M_{\text{дин.макс}} = M_{\text{т}} + M_{\text{с.макс}} = 50 + 17{,}7 + 67{,}7\ н \cdot м.$$

Относительное отклонение динамического момента

$$\frac{\Delta M}{M_{\text{дин.ср}}} = \frac{M_{\text{дин.макс}} - M_{\text{дин.ср}}}{M_{\text{дин.ср}}} = \frac{67{,}7 - 62{,}8}{62{,}8} = 0{,}078.$$

4. По механической характеристике двигателя для максимального и минимального статического момента находим скорости вращения при рабочем ходе $n_{\text{р.мин}}$ и $n_{\text{р.макс}}$, среднюю скорость $n_{\text{р.ср}}$, а затем и относительное отклонение скорости.

$$n_{\text{р.ср}} = 940\ об/мин; \quad \frac{\Delta n}{n_{\text{р.ср}}} = \frac{n_{\text{р.макс}} - n_{\text{р.ср}}}{n_{\text{р.ср}}} \cong 0{,}03.$$

5. Момент инерции ротора двигателя, тормозного шкива, муфты, редуктора

$$J_1 = \frac{1{,}25 \cdot GD^2_{\text{д}}}{4} = \frac{1{,}25 \cdot 0{,}26}{4} = 0{,}081\ кг \cdot м^2.$$

(Коэффициент 1,25 служит для приближенного учета моментов инерции тормозного шкива, муфты и редуктора.)

6. Максимальный суммарный момент инерции движущихся частей, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\text{макс}} = J_1 + \frac{91{,}2\,(m_{\text{т}} + m_{\text{макс}})\,v^2}{n^2} =$$

$$= 0{,}081 + \frac{91{,}2\,(3\,000 + 15\,000)\,0{,}6^2}{890^2} = 0{,}831 \ кг \cdot м^2.$$

Минимальный суммарный приведенный момент инерции

$$J_{\text{мин}} = J_1 + \frac{91{,}2\,(m_{\text{т}} + m_{\text{мин}})\,v^2}{n^2} =$$

$$= 0{,}081 + \frac{91{,}2\,(3\,000 + 5\,000)\,0{,}6^2}{890^2} = 0{,}415 \ кг \cdot м^2.$$

Среднее значение момента инерции

$$J_{\text{ср}} = \frac{J_{\text{макс}} + J_{\text{мин}}}{2} = \frac{0{,}831 + 0{,}415}{2} = 0{,}623 \ кг \cdot м^2.$$

Относительное отклонение момента инерции

$$\frac{\Delta J}{J_{\text{ср}}} = \frac{J_{\text{макс}} - J_{\text{ср}}}{J_{\text{ср}}} = \frac{0{,}831 - 0{,}623}{0{,}623} = 0{,}334.$$

7. Проделав предварительные вычисления, находим максимальную неточность остановки вала двигателя, а затем пересчитываем угловой путь в величину неточности остановки тележки.

По формуле (8)

$$\Delta\varphi_{\text{т.макс}} = \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{\text{р.ср}}\, t_{\text{а.ср}}}{60}\left(\frac{\Delta n}{n_{\text{р.ср}}} + \frac{\Delta t}{t_{\text{а.ср}}}\right) +$$

$$+ \frac{J_{\text{ср}} n^2_{\text{р.ср}}}{1\,140 M_{\text{дин.ср}}}\left(2\frac{\Delta n}{n_{\text{р.ср}}} + \frac{\Delta J}{J_{\text{ср}}} + \frac{\Delta M}{M_{\text{дин.ср}}}\right) =$$

$$= \frac{0{,}5 \cdot 191}{360} + \frac{940 \cdot 0{,}2}{60}(0{,}03 + 0{,}15) +$$

$$+ \frac{0{,}623 \cdot 940^2}{1\,140 \cdot 62{,}8}(2 \cdot 0{,}03 + 0{,}334 + 0{,}078) =$$

$$= 0{,}265 + 0{,}565 + 3{,}62 = 4{,}45 \text{ оборота.}$$

Максимальная неточность остановки тележки

$$\Delta s_{\text{т.макс}} = \pm \frac{\pi \Delta\varphi_{\text{т.макс}} D_{\text{з}}}{i_{\text{р}}} =$$

$$= \pm \frac{3{,}14 \cdot 4{,}45 \cdot 0{,}4}{31{,}5} = \pm 0{,}178 \ м = \pm 178 \ мм.$$

Полученная при одноступенчатом торможении неточность остановки превышает заданную, поэтому необходимо перед остановкой переключать двигатель на пониженную скорость вращения.

Найдем среднее значение необходимой пониженной скорости $n_{\text{п.ср}}$.

Подставив в предыдущую формулу значение $\Delta s_{\text{т.доп}} = \pm 25$ *мм*, найдем допустимую неточность остановки вала двигателя

$$\Delta\varphi_{\text{т.доп}} = \pm 0{,}625 \text{ оборота;}$$

из (8) получим уравнение для $n_{\text{п.ср}}$:

$$An_{\text{п.ср}}^2 + Bn_{\text{п.ср}} - C = 0,$$

где

$$A = \frac{J_{\text{ср}}}{1\,140 M_{\text{дин.ср}}}\left(2\frac{\Delta n}{n_{\text{п.ср}}} + \frac{\Delta J}{J_{\text{ср}}} + \frac{\Delta M}{M_{\text{дин.ср}}}\right);$$

$$B = \frac{t_{\text{а.ср}}}{60}\left(\frac{\Delta n}{n_{\text{п.ср}}} + \frac{\Delta t}{t_{\text{а.ср}}}\right);$$

$$C = \Delta\varphi_{\text{т.доп}} - \frac{\delta i}{360}.$$

Относительное отклонение скорости на искусственной характеристике пониженной скорости зависит от жесткости этой характеристики. Примем $\frac{\Delta n}{n_{\text{п.ср}}} = 0{,}1$

$$A = \frac{0{,}623}{1\,140 \cdot 62{,}8}(2 \cdot 0{,}1 + 0{,}334 + 0{,}078) = 0{,}53 \cdot 10^{-5};$$

$$B = \frac{0{,}2}{60}(0{,}1 + 0{,}15) = 0{,}835 \cdot 10^{-3};$$

$$C = 0{,}625 - 0{,}265 = 0{,}36.$$

Получаем квадратное уравнение

$$0{,}53 \cdot 10^{-5} \cdot n_{\text{п.ср}}^2 + 0{,}835 \cdot 10^{-3} n_{\text{п.ср}} - 0{,}36 = 0.$$

Решив уравнение, находим искомую величину пониженной скорости

$$n_{\text{п.ср}} = 193 \text{ оборота.}$$

Часто неточность остановки определяется упрощенным способом. При этом считается, что погрешность пути торможения равна половине пути за время снижения скорости.

Это соответствует допущению, что погрешностями переключающих аппаратов (конечных выключателей, реле, контакторов и т. д.) можно пренебречь, а наложение неточностей начальной скорости

вращения, моментов сопротивления и инерции приводит к ошибке не более 50% расчетного пути торможения.

$$\Delta\varphi_{\text{т.макс}} = \pm \frac{\varphi'''_{\text{т}}}{2}.$$

В нашем примере

$$\Delta\varphi_{\text{т.макс}} = \pm \frac{J_{\text{макс}} \cdot n^2_{\text{нач}}}{2 \cdot 1\,140\,(M_{\text{т}} + M_{\text{с.макс}})} =$$

$$= \pm \frac{0{,}831 \cdot 940^2}{2 \cdot 1\,140 \cdot 67{,}7} = \pm 5{,}07 \text{ оборота.}$$

Неточность остановки тележки при торможении с высокой скорости

$$\Delta s_{\text{т.макс}} = \pm \frac{3{,}14 \cdot 5{,}07 \cdot 0{,}4}{31{,}5} = \pm 0{,}202 \text{ м} = \pm 202 \text{ мм}.$$

2. КОМАНДОАППАРАТЫ И КОНЕЧНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ. ПОГРЕШНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АППАРАТОВ

В схемах автоматической точной остановки электроприводов широко используются различного типа командоаппараты и конечные выключатели. Эти два типа аппаратов отличаются по принципу действия. Регулируемые кулачковые командоаппараты имеют барабаны с переключающими шайбами, воздействующими на контактную систему. Вал командоаппарата соединяется через зубчатые или цепные передачи с приводом механизма. Контакты переключаются при определенных углах поворота барабана в зависимости от пройденного механизмом пути.

Конечные выключатели устанавливаются в определенных точках пути механизма и приводятся в действие переключающими упорами, установленными на механизмах. Переключающий упор чаще всего выполняется в виде прямолинейной полосы металла со скошенными краями. Такой упор называют «линейкой».

Для обеспечения безаварийной надежной работы схем управления и получения требуемой точности остановки электропривода необходимо правильно выбрать тип командоаппарата или конечного выключателя с учетом свойственной данному аппарату погрешности (неточности срабатывания), соответствующего конструктив-

ного исполнения (защищенное, пыленепроницаемое, водозащищенное, взрывозащищенное), требуемого для срабатывания усилия, максимально допустимой скорости переключающего упора и т. д.

КОМАНДОАППАРАТЫ

На рис. 5 приведен разрез регулируемого командоаппарата серии КА-4000. На валу барабана имеется ряд шайб *1* с переключающими кулачками *2* и *3*. На каждой шайбе может быть установлено до трех включающих и трех отключающих кулачков. Кулачки могут переставляться в различные точки по окружности шайбы. Подвижные контакты *5*, замыкающие неподвижные *4*, укреплены на рычаге *6*, вращающемся вокруг оси *7*. Число рычагов с контактами может достигать 24 (см. приложение 3). Под действием пружины *8* контакты удерживаются в разомкнутом состоянии. В определенном положении механизма кулачок *2* воздействует на ролик *9*, рычаг *6* поворачивается и контакты *4* замы-

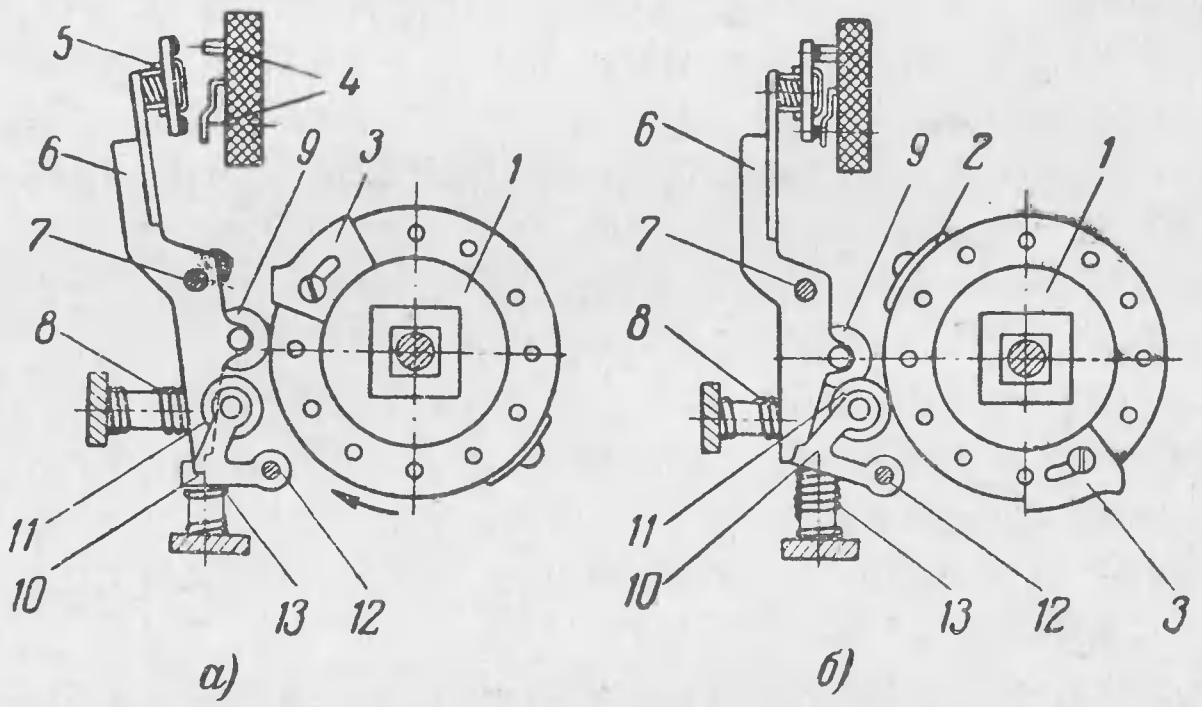


Рис. 5. Конструкция командоаппарата серии КА-4000.
а — контакты разомкнуты; *б* — контакты замкнуты.

каются. Во включенном состоянии контакты удерживаются защелкой *10*, вращающейся вокруг оси *12*. В поднятом положении защелка удерживается пружиной *13*. В момент нажатия кулачка *3* на ролик *11* защелка освобождается, и под действием пружины *8* происходит

мгновенное размыкание контактов [1]. Кулачки *2* и *3* могут нажимать соответственно на ролики *9* и *11*.

Скорость вращения барабана для кратковременного режима не должна превышать 60 *об/мин* при одном включающем и одном отключающем кулачке на шайбе. При увеличении числа кулачков скорость вращения барабана должна быть соответственно уменьшена. Так, при четырех кулачках на шайбе скорость барабана не должна превышать 30 *об/мин*. Необходимо иметь в виду, что включающий и выключающий кулачки должны быть смещены на угол не менее 21°. Конструкция контактного и переключающего устройства обеспечивает точность замыкания или размыкания контактов командоаппаратов КА-4000, равную ±0,5° угла поворота кулачковой шайбы.

Для реверсивных механизмов, требующих высокой точности остановки, передаточное число от механизма к барабану командоаппарата выбирается таким образом, чтобы угол поворота барабана за полный ход механизма был равен приблизительно 320—340°. Угол выбирается менее одного оборота, но близким к 360°. Это объясняется тем, что погрешность ±0,5° дает тем меньшую ошибку в пути механизма, чем больше соответствующий угол поворота барабана. Так, например, при ходе механизма 3 000 *мм* и угле поворота барабана 300° ошибка ±0,5° составляет ±5 *мм* пути механизма; если же выбрать угол в 10 раз меньшим, т. е. 30°, то та же ошибка командоаппарата приведет к неточности остановки ±50 *мм*, т. е. в 10 раз большей.

Для нереверсивных механизмов, имеющих «шаговое» перемещение равными отрезками (цепные транспортеры, кольцевые конвейеры, вращающиеся столы), рекомендуемый угол поворота барабана командоаппарата за 1 шаг — 360°.

Наиболее надежными являются командоаппараты серий КА4658 и КА4324, имеющие соответственно водозащищенное и пыленепроницаемое исполнение. Командоаппараты КА4658 имеют 5 цепей, что позволяет получать необходимые команды как для предварительного

---

[1] Командоаппаратами и конечными выключателями с мгновенным, или «моментным», размыканием контактов называются такие аппараты, у которых размыкание контактов происходит за короткий промежуток времени, не зависящий от скорости механизма.

перехода на пониженную скорость, так и на окончательное затормаживание электропривода. В приложении 3 приведены технические данные командоаппаратов серии КА4000 с указанием исполнения, числа цепей, передаточного числа встроенного редуктора и др.

В настоящее время промышленностью выпускаются также командоаппараты серии КА-400. При скорости вращения барабана 30 *об/мин* погрешность командоаппарата равна ±0,5°. Однако эти командоаппараты не имеют мгновенного размыкания контактов, что может приводить к обгоранию контактов при низкой скорости механизма и к увеличенной неточности срабатывания.

Следует иметь в виду, что высокая точность остановки электропривода с помощью командоаппарата не может быть получена, если используется канатный привод, так как из-за вытягивания канатов меняется соотношение между положением механизма и углом поворота барабана командоаппарата. Нельзя применять командоаппараты в тех случаях, когда при работе механизма возможно проскальзывание, например, буксовка колес самоходной тележки и т. п. В этих случаях необходимая точность остановки достигается применением конечных выключателей.

210242

КОНЕЧНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Электропромышленностью выпускается много типов конечных выключателей, отличающихся по степени защиты от окружающей среды (открытые, пыле- и брызгозащищенные, водозащищенные и взрывозащищенные выключатели), по скорости размыкания контактов, габаритным размерам, точности работы, оцениваемой величиной погрешности, конструктивному исполнению (выключатели с рычагом и роликом, с нажимным толкателем, штифтом и др.), величине коммутируемого тока и т. д.

На производственных механизмах наиболее широко применяются конечные выключатели следующих типов: крановые конечные выключатели серии КУ-500 (КУ-501, КУ-503, КУ-504, КУ-506); выключатели типов ВК-211, ВК-311А; выключатели серий ВК-400 (по типу ранее выпускавшейся серии ВК-100) и ВК-500; малогабаритные конечные выключатели серии ВКМ (ВКМ-411, ВКМ-511

Государственная публичная
библиотека
им. В. Г. Белинского
г. Свердловск

и т. д. до ВКМ-1111), взрывозащищенные конечные выключатели ВК-700/2, ВВ-5 и др. Необходимые для выбора конечных выключателей технические данные приведены в приложении 2.

Для обеспечения точной остановки механизма сам конечный выключатель, подающий команду на замедление электропривода, должен вносить минимальную по-

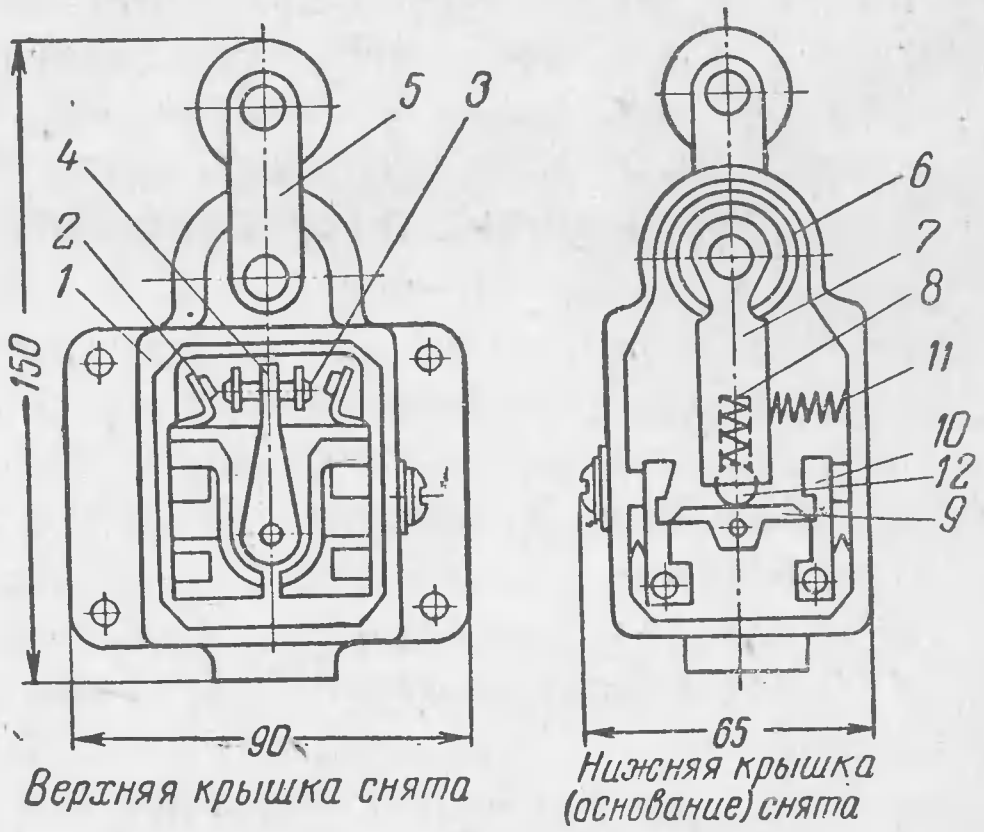


Рис. 6. Конечный выключатель ВК-211Б.

грешность, вызываемую разбросом в срабатывании контактов аппарата. Причинами этой погрешности являются изменение температуры, влажности, смазки трущихся поверхностей и т. д.

Так как обычно точная остановка достигается предварительным переводом электродвигателя на пониженную скорость, при выборе конечного выключателя для исключения замедленного разрыва цепи и повышения точности остановки следует отдавать предпочтение выключателям с моментным размыканием контактов. Хорошо зарекомендовали себя в промышленности крановые конечные выключатели серии КУ-500, имеющие мощные контакты, надежно и с высокой точностью отключающие токи катушек контакторов при достаточно низких скоростях механизмов.

Конечные выключатели ВК-211 и ВК-311А. Рассмотрим устройство и принцип действия конечных выключателей с моментным размыканием контактов на примере выключателя ВК-211Б (рис. 6). В корпусе *1* установле-

ны неподвижные контакты *2*. Подвижные контакты *3* укреплены на рычаге *4*. Переключение контактов осуществляется поворотом приводного рычага *5*, соединенного при помощи набора ленточных пружин *6* с поводком *7*. При повороте приводного рычага под действием усилия пружины *8*, передаваемого на шарик *12*, планка *9*, жестко связанная с рычагом *4*, мгновенно поворачивается в момент освобождения ее собачкой *10*. При этом контакты выключателя переключаются. Время переключения контактов равно 0,04 *сек* даже при очень низкой скорости переключающего упора 10 *мм/мин*.

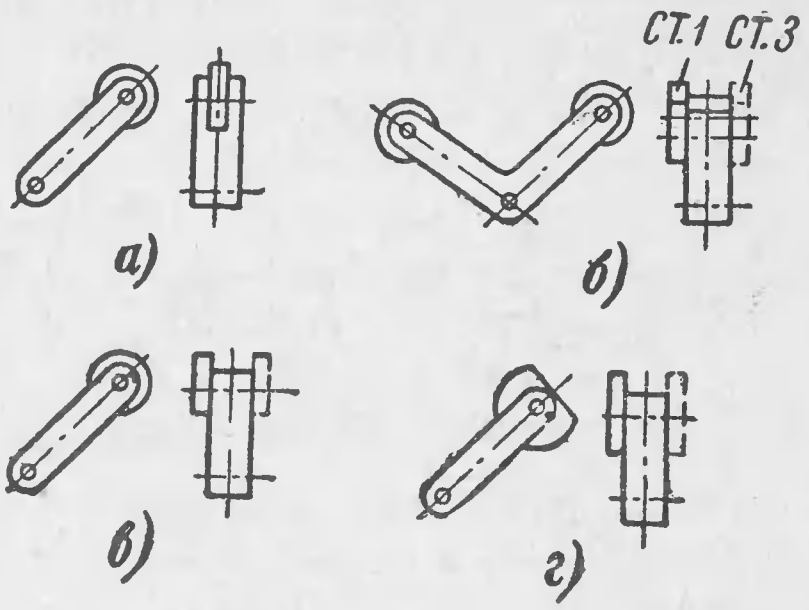


Рис. 7. Различные исполнения рычагов с роликами конечных выключателей ВК-211 и ВК-311.

а — исполнение 1, ступень 2; *б* — исполнение 2, ступени 1 и 3; *в* — исполнение 3, ступени 1 и 3; *г* — исполнение 4, ступени 1 и 3.

Во всех исполнениях выключателей, кроме второго (рис. 7), возврат контактов в исходное положение осуществляется пружиной *11*.

Выключатели ВК-211 (ВК-211А, ВК-211Б, ВК-211П) имеют пыле- и брызгонепроницаемое исполнение, а выключатели ВК-311А — водозащищенное исполнение. Срок службы, характеризующийся числом включений до полного износа, у ВК-311А в 2 раза больше (2 млн. включений по сравнению с 1 млн. включений у ВК-211).

Выключатели имеют один замыкающий и один размыкающий контакты. Корпус выключателя может быть установлен в любом положении. Рычаг с роликом может быть установлен на валике под любым углом. Для срабатывания выключателя необходимо повернуть рычаг на 12°. Свободный дополнительный ход около 15° служит для защиты от поломок.

Необходимо иметь в виду, что конечные выключатели ВК-211 и ВК-311А в исполнении с обычным роликом являются аппаратами одностороннего действия (переключение производится при нажатии на выключатель с одной определенной стороны). В тех случаях, когда выключатель фиксирует не крайние, а промежуточное

положение механизма и возможно движение переключающего упора («линейки») с разных сторон, нужно устанавливать конечный выключатель со срезанным роликом (исполнение 3, рис. 7). При движении линейки в обратном направлении ролик поворачивается вокруг своей оси, а рычаг остается неподвижным: после прохода линейки ролик под действием пружины поворачивается в исходное положение. Можно также использовать выключатель с двумя роликами (исполнение 2).

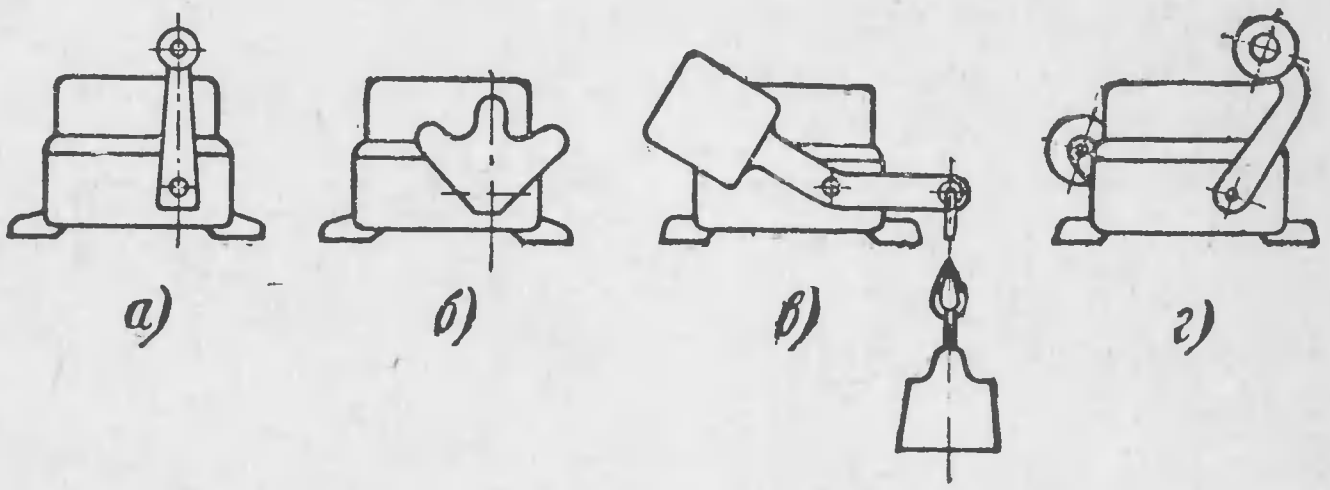


Рис. 8. Крановые конечные выключатели серии КУ-500.
а — КУ-501; *б* — КУ-504; *в* — КУ-503; *г* — КУ-506.

Для защиты выключателя от механических ударов необходимо выбирать линейку с небольшим углом скоса (10—30°, в зависимости от скорости механизма).

Исследования погрешностей конечных выключателей ВК-211 показали, что при открывании размыкающего контакта максимальная величина неточности срабатывания выключателя, характеризуемая наибольшим отклонением линейки в момент переключения от среднего положения, равна ±3 *мм*, а при закрывании замыкающего контакта — ±4 *мм*. Среднее положение линейки в момент срабатывания конечного выключателя определяется в результате большого числа опытов.

Конечные выключатели серии КУ-500. Крановые конечные выключатели серии КУ-500 выпускаются в следующих исполнениях: КУ-501, КУ-503, КУ-504 и КУ-506 (см. рис. 8). Максимальная скорость механизма равна 150 *м/мин* для КУ-501, 100 *м/мин* для КУ-504 и 300 *м/мин* для КУ-506. Для КУ-503 предельная скорость движения не ограничивается.

Крановые конечные выключатели имеют по два контакта. Контакты допускают длительный ток до 10 *а*,

отключают в индуктивной цепи постоянного тока 220 *в* нагрузку 1,5 *а*.

Основным типом является конечный выключатель КУ-501. Он может быть установлен в любом положении; рычаг с роликом может устанавливаться под углом 90° и 180° по отношению к нормальному положению. В отличие от ВК-311А и ВК-211, рычаг выключателя КУ-501 имеет 3 положения. КУ-501 является аппаратом двухстороннего действия.

Лабораторные исследования крановых конечных выключателей показали высокую точность их работы. При скоростях механизма выше 1 *м/сек* заметных погрешностей не наблюдалось.

Конечные выключатели серии ВКМ. Малогабаритные выключатели мгновенного действия серии ВКМ используются в основном на металлорежущих станках. Выключатели имеют пыле- и брызгонепроницаемое исполнение, могут иметь нажимной штифт (ВКМ-411, ВКМ-511, ВКМ-611) или нажимной ролик (ВКМ-811, ВКМ-911, ВКМ-1011, ВКМ-1111), устанавливаются в любом положении, имеют один замыкающий и один размыкающий контакты. Максимальное сечение подсоединяемых проводов 1,5 *мм*^{2}. Неточность срабатывания по пути при скорости переключающего упора не менее 10 *мм/мин* не превышает ±0,05 *мм*.

На рис. 9,*а* показаны разрезы малогабаритного конечного выключателя ВКМ-411. В пластмассовом корпусе *6* установлены неподвижные контакты *1*, подвижные контакты *2*, переключающий механизм *4*, пружины *7* и *8*. Корпус закрыт крышкой *5*. Через отверстие в крышке проходит нажимной штифт *3*.

Перемещение штифта изменяет направление действия сил пружин *8* переключающего механизма, что приводит к мгновенному перебросу подвижных контактов, соединенных непосредственно с переключающим механизмом. Когда нажатие на штифт прекращается, контакты возвращаются в исходное положение под действием возвратной пружины *7*.

Остальные переключатели серии ВКМ отличаются от ВКМ-411 защитным металлическим кожухом, а также типом и расположением приводного устройства. Общий вид выключателя ВКМ-1111 приведен на рис. 9,*б*.

Погрешности выключателей серий ВК-400, ВК-500.

Выключатели этих серий не имеют «моментного» переключения контактов, однако в некоторых случаях они могут использоваться в схемах точной остановки. Подробная техническая характеристика приведена в приложении 2.

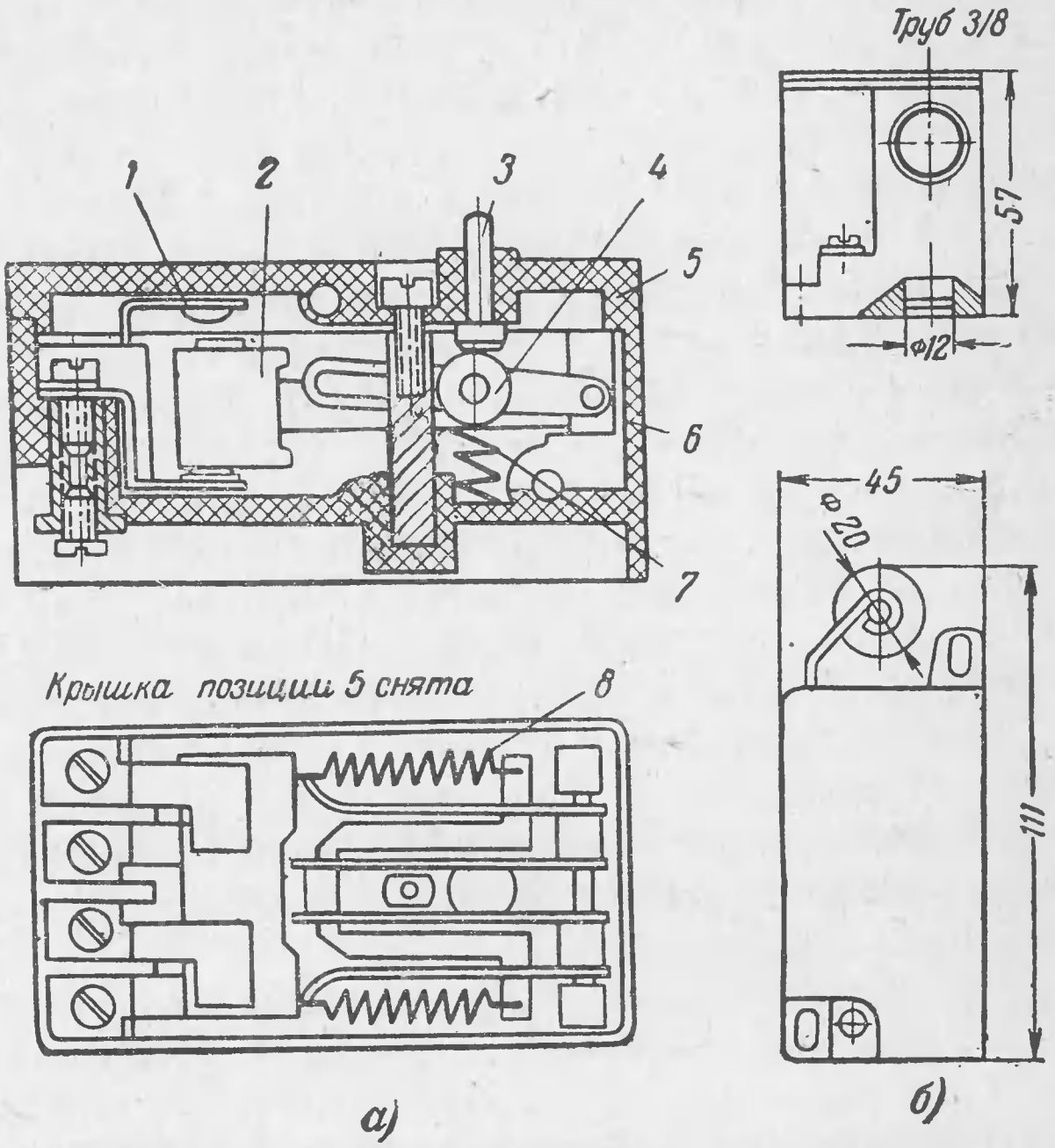


Рис. 9. Малогабаритные конечные выключатели.
а — разрез выключателя ВКМ-411; *б* — конечный выключатель ВКМ-1111.

При выборе этих конечных выключателей необходимо учитывать, что неточность хода нажимного устройства равна ± (0,5—0,7) *мм* в зависимости от его конструкции (нажимной толкатель или ролик).

Угол скоса линейки ограничивается заводом-изготовителем: он должен быть не более 30° при скорости механизма до 12 *м/мин* и не более 15° при скорости 48—60 *м/мин*.

Лифтовые путевые переключатели ЭП43-41. Для точной остановки лифтов используются этажные переключатели типа ЭП43-41. Рычаг переключателя имеет три

коммутационных положения — среднее и два крайних (левое и правое). Контакты мостикового типа допускают длительный ток 1,5 *а*, кратковременный ток включения 8 *а* в цепи 220 *в* переменного тока. Отключаемый ток индуктивной цепи переменного тока 127 *в* равен 2,5 *а*, 220 *в* — 1 *а*.

Контакты замыкаются в соответствии с диаграммой:

№ контактов	Положение рычага		
	левое	среднее	правое
1	×	—	—
2	—	—	×
3	—	×	×
4	×	×	—

Для срабатывания выключателя необходимо отклонить рычаг вправо или влево на угол 17°. Угол поворота более 20° нежелателен.

3. ПРАВИЛЬНЫЙ ВЫБОР МЕСТ УСТАНОВКИ КОНЕЧНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ, ФОРМЫ И ДЛИНЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО УПОРА

РАСЧЕТ МЕСТ УСТАНОВКИ КОНЕЧНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Графики снижения скорости. На рис. 10,*а* показан характерный пример установки двух конечных выключателей для получения точной остановки поступательно перемещающегося механизма *1* — выключателя предварительного замедления *КВП* и выключателя точной остановки *КВТ*.

В момент переключения упором *2* конечного выключателя *КВП* начинается снижение скорости двигателя от рабочей $n_р$ до пониженной $n_п$ (рис. 10,*б*).

На рис. 10,*а* и *б* отмечен отрезок s'. Этот путь механизм проходит за время снижения скорости до $n_п$. К конечному выключателю точной остановки *КВТ* механизм должен подойти с установившейся пониженной скоростью. Так как величина пути s' не является постоянной, необходимо иметь некоторый участок пути, на котором механизм работает на пониженной скорости. Этот отре-

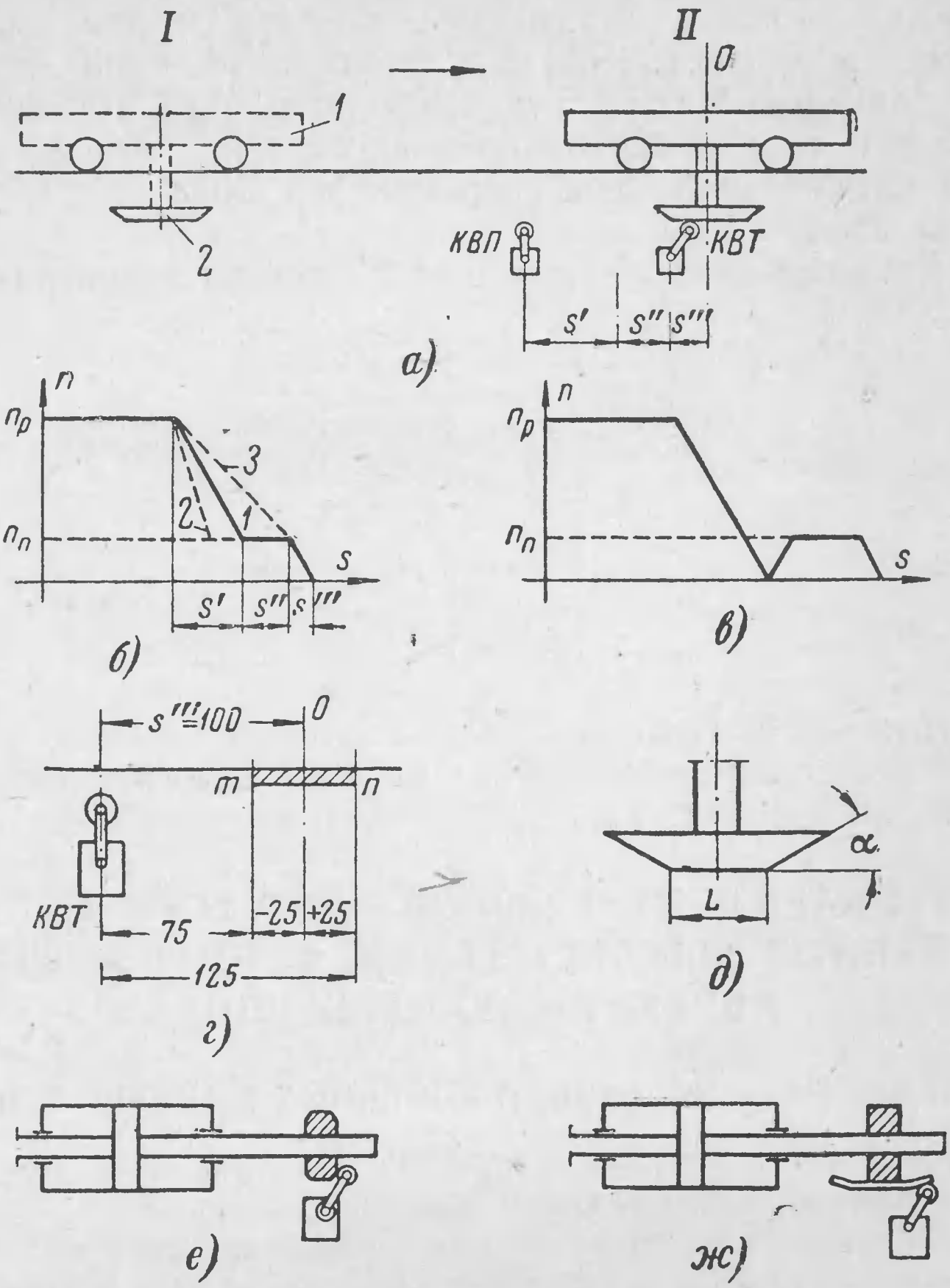


Рис. 10. Установка конечных выключателей, выбор формы и длины линейки.

а — расположение конечных выключателей предварительного замедления и точной остановки; *б*, *в* — графики снижения скорости; *г* — пример установки выключателя точной остановки *КВТ*; *д* — линейка; *е*, *ж* — примеры неправильной (*е*) и правильной (*ж*) формы переключающего упора.

зок обозначен s''. И наконец, от момента воздействия на конечный выключатель *КВТ* до точной остановки в положении *0* (рис. 10,*а*) механизм проходит путь s'''.

Время работы двигателя на пониженных скоростях и соответственно величины путей s' и s'' должны быть по возможности небольшими, чтобы не снижать произ-

водительность механизма. Для уменьшения пути предварительного замедления s' обычно используется электрическое торможение (динамическое, противовключением, конденсаторное) либо механическое с помощью тормоза [1].

Иногда бывает сложно автоматически осуществить график торможения по рис. 10,*б* с непосредственным переходом от рабочей к ползучей скорости. В этих случаях используют график торможения, показанный на рис. 10,*в*. Производится полное затормаживание электропривода от рабочей скорости $n_р$ до нуля с последующим включением двигателя на пониженную скорость $n_п$.

При выборе способа и эффективности торможения следует иметь в виду, что темп замедления часто лимитируется пробуксовкой колес, допустимым током двигателя, специальными технологическими требованиями. Например, чрезмерно быстрое торможение чугуновозной тележки может быть недопустимым из-за расплескивания жидкого металла.

Как правильно выбрать места установки конечных выключателей. Для правильной установки конечных выключателей необходимо предварительно выполнить несложные вычисления пути торможения и неточности остановки (см. пример 2).

Конечный выключатель точной остановки *КВТ* должен быть установлен перед заданным положением *0* на расстоянии, равном расчетному среднему пути торможения s'''. На рис. 10,*г* показана установка *КВТ* для случая, когда $s'''=100$ *мм*, а максимальная неточность остановки равна ± 25 *мм*. На рисунке отмечена зона *m—n*, на которой практически окажется точка остановки механизма.

Для повышения производительности механизма расстояние между *КВП* и *КВТ* нужно выбирать минимально возможным. Однако это расстояние должно быть достаточным для надежного замедления механизма до выбранной пониженной скорости. Дело в том, что снижение скорости от $n_р$ до $n_п$ может идти не по расчетному графику (прямая *1*), а быстрее или медленнее (см. рис. 10,*б*, пунктирные прямые *2* и *3*). Из-за неточности

---

[1] Формулы расчета пути механизма при разных способах торможения см. приложение 1.

пути торможения необходимо выбирать расстояние между конечными выключателями *КВТ* и *КВП* равным не менее $s'+\Delta s'$. Здесь $\Delta s'$ — ошибка в пути торможения s'. Обычно в практических расчетах принимают $\Delta s'=0{,}5\,s'$ и расстояние между *КВТ* и *КВП* берут равным (1,5—2,0) s'. Так, например, если путь торможения s' равен 300 *мм*, то расстояние между *КВТ* и *КВП* следует установить не менее 450 *мм*. Это обеспечивает надежный выход механизма на пониженную скорость и, следовательно, относительно постоянное значение начальной скорости заключительного этапа торможения.

ВЫБОР ФОРМЫ И ДЛИНЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО УПОРА

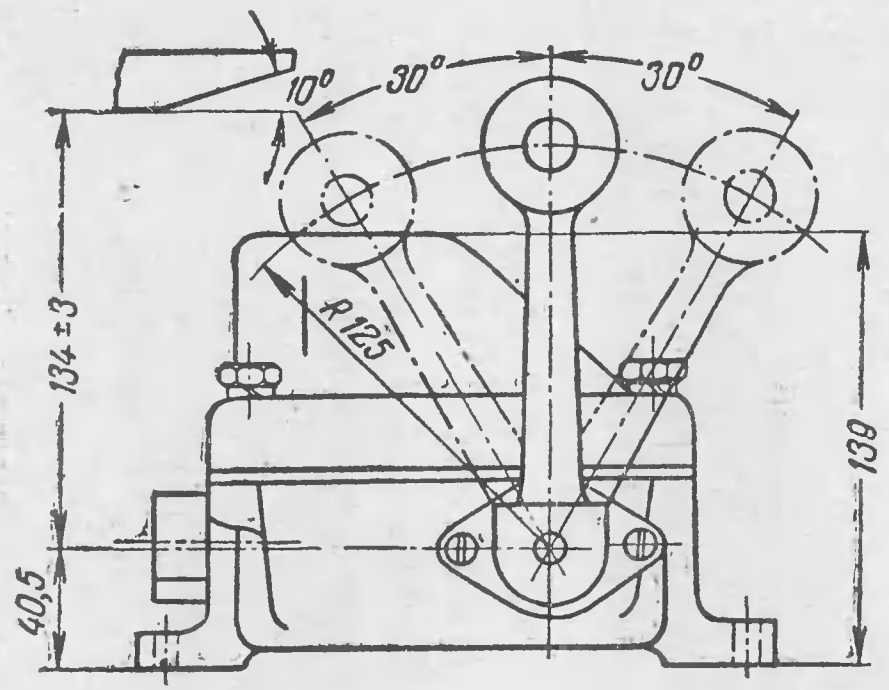
На рис. 10,*д* показан переключающий упор, выполненный в виде «линейки» со скошенными концами. Такая линейка наиболее часто используется на практике для конечных выключателей с рычагом и роликом КУ-501, ВК-311А и др. Чем меньше угол скоса α, тем более плавно работает конечный выключатель, тем меньше он изнашивается. Особенно важно это требование плавности нажатия линейки на рычаг конечного выключателя для конечных выключателей серий ВК (ВК-211, ВК-311А и др.), плохо работающих в условиях ударов.

Пример неправильной формы упора, выполненного в виде кольца, не имеющего скоса, приведен на рис. 10,*е*. Такой упор, часто используемый, например, на пневматических механизмах, не обеспечивает плавного нажатия на рычаг конечного выключателя, а при обратном ходе не дает безударного возврата рычага в исходное положение. Срок службы выключателя в этом случае резко сокращается.

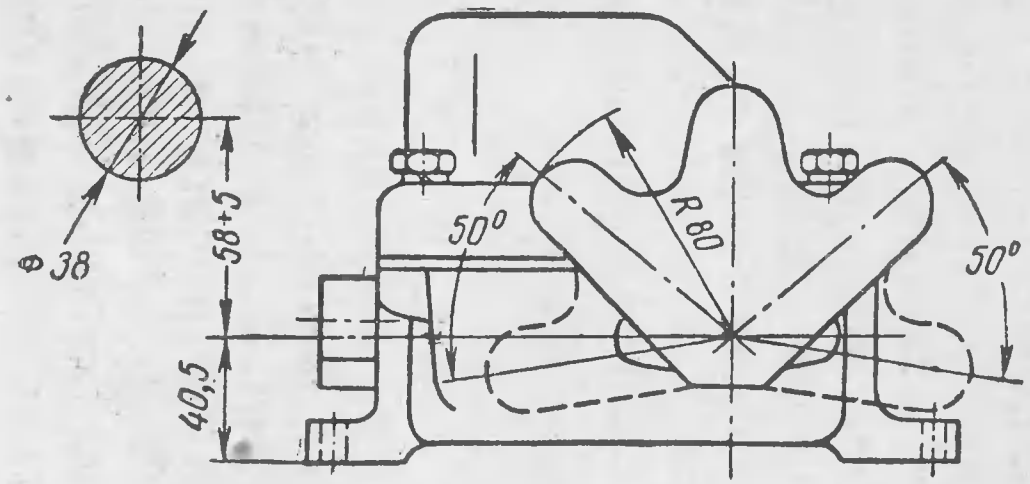
На рис. 10,*ж* показана правильная форма линейки. Рекомендуемый угол скоса линейки равен 10°. Расстояние от такой линейки до оси рычага выключателя КУ-501 задается заводом-изготовителем и равно 134 *мм* (рис. 11,*а*).

На рис. 11,*б*, *в* поясняется, как должны располагаться упоры по отношению к конечным выключателям КУ-504 и КУ-506.

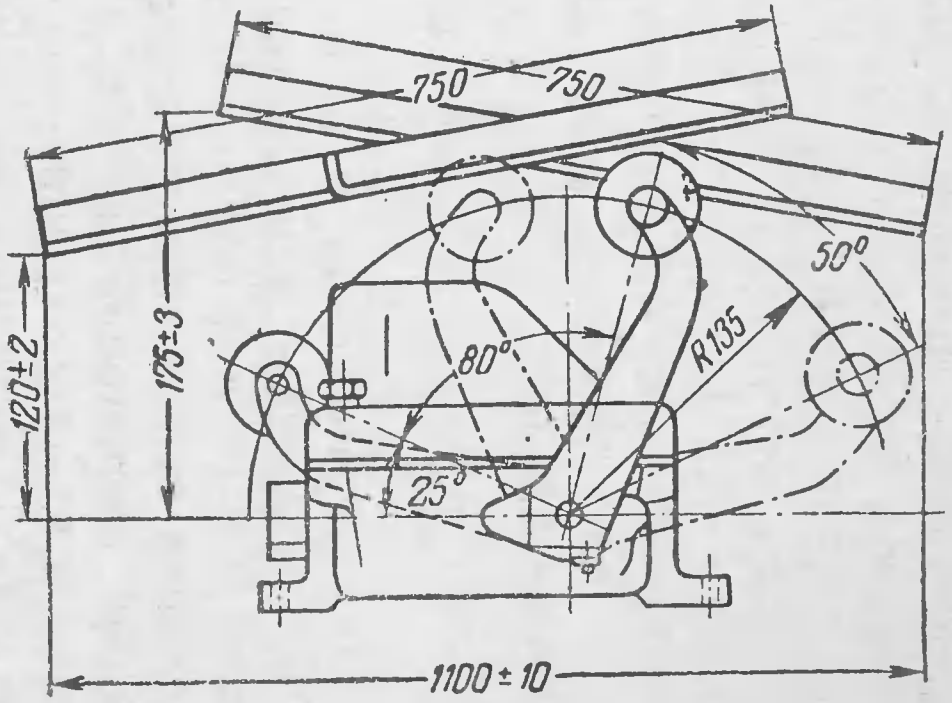
Для расчета длины линейки необходимо знать величину среднего пути торможения $s_{т.ср}$ и максимальной неточности остановки $\Delta s_{т.макс}$. Когда ход механизма огра-



а)



б)



в)

Рис. 11. Расположение переключающих упоров по отношению к конечным выключателям серии КУ-500.

а — КУ-501; *б* — КУ-504; *в* — КУ-506.

ничивается конечным выключателем, линейка обычно должна иметь запас по длине, чтобы исключить возможность освобождения рычага конечного выключателя, так как это может повлечь за собой аварию при ошибочном повторном включении электропривода и поломку конечного выключателя одностороннего действия при обратном ходе механизма. Минимальная необходимая длина линейки равна сумме среднего пути торможения и максимальной неточности остановки.

В приближенных расчетах обычно принимают длину линейки равной

$$L \geqslant 1{,}5 s_{\text{т.ср}}.$$

При торможении в одну ступень без предварительного замедления длина линейки может получиться значительной (1 *м* и более). В этих случаях можно взамен конечных выключателей с самовозвратом рычага в исходное положение КУ-501, ВК-311А (исполнение *1*) и др., использовать конечные выключатели типа КУ-504 или ВК-311А (исполнение *2*), а с двумя роликами, без пружины самовозврата. Такие выключатели переключаются с помощью короткого упора; после прекращения воздействия упора состояние контактов выключателя не изменяется. В исходное положение контакты возвращаются при обратном ходе механизма.

Пример 2. Определить места установки конечных выключателей и длину линейки для тележки, рассмотренной в примере 1 (рис. 4) при замене командоаппарата *8* конечными выключателями ВК-311А.

Рабочая скорость вращения двигателя $n_{\text{р}}=940$ *об/мин* ($v_{\text{р}}=0{,}6$ *м/сек*).

Пониженная скорость $n_{\text{п}}=190$ *об/мин* ($v_{\text{п}}=0{,}12$ *м/сек*).

Время срабатывания аппаратуры $t_{\text{а}}=0{,}2$ *сек.*

Для торможения используется механический тормоз.

1. Путь, проходимый тележкой за время срабатывания аппаратуры, $s_{\text{а}1}=v_{\text{р}}t_{\text{а}}=0{,}6\cdot 0{,}2=0{,}12$ *м* $=120$ *мм.*

2. Время замедления от $n_{\text{р}}$ до $n_{\text{п}}$

$$t_{\text{т}1}=\frac{J_{\text{ср}}(n_{\text{р}}-n_{\text{п}})}{9{,}55M_{\text{дин.ср}}}=\frac{0{,}623\,(940-190)}{9{,}55\cdot 62{,}8}=0{,}78\ \textit{сек.}$$

3. Путь тележки за время замедления от $n_{\text{р}}$ до $n_{\text{п}}$:

$$s'_{\text{т}}=\frac{v_{\text{р}}+v_{\text{п}}}{2}\,t_{\text{т}1}=\frac{0{,}6+0{,}12}{2}\,0{,}78=0{,}28\ \textit{м}=280\ \textit{мм.}$$

4. Суммарный путь торможения до $n_п$

$$s'_т = s_{т1} + s_{а1} = 280 + 120 = 400 \text{ мм}.$$

5. Путь, проходимый тележкой после срабатывания выключателя *КВТ* за время работы аппаратуры,

$$s_{а2} = v_п t_а = 0{,}12 \cdot 0{,}2 = 0{,}024 \text{ м} = 24 \text{ мм}.$$

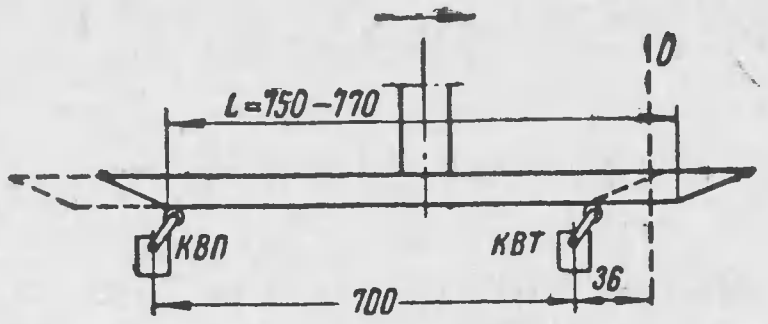


Рис. 12. К примеру расчета длины линейки.

6. Время и путь торможения с пониженной скорости до полной остановки

$$t_{тз} = \frac{J_{ср} n_п}{9{,}55 M_{дин.ср}} = \frac{0{,}623 \cdot 190}{9{,}55 \cdot 62{,}8} \cong 0{,}2 \text{ сек};$$

$$s_{тз} = \frac{v_п t_т}{2} = \frac{0{,}12 \cdot 0{,}2}{2} = 0{,}012 \text{ м} = 12 \text{ мм}.$$

7. Суммарный путь торможения с $n_п$ до полной остановки

$$s'''_т = s_{тз} + s_{а2} = 12 + 24 = 36 \text{ мм}.$$

Конечный выключатель *КВТ* установим на расстоянии $s'''_т = 36$ *мм* от положения остановки (рис. 12). Конечный выключатель КВП должен быть установлен перед КВТ на расстоянии не менее $1{,}5\, s'_т = 600$ *мм*. Примем это расстояние равным 700 *мм*. Длина линейки (рис. 12) должна быть не менее 750—770 *мм*, чтобы в момент остановки тележки оба конечных выключателя оставались нажатыми.

4. БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ

Недостатками описанных выше механических конечных выключателей и командоаппаратов являются износ и разрегулировка, особенно при большой частоте включений и высокой скорости движения механизмов. Допустимый верхний предел скорости механизмов ограничивается заводами-изготовителями. В некоторых случаях могут быть нежелательны шум и радиопомехи, создаваемые при работе механических выключателей. Поэтому в схемах электроавтоматики все чаще применяются бес-

контактные индуктивные датчики положения механизмов и фотореле [1].

В схемах точной остановки электроприводов бесконтактные датчики могут использоваться как для подачи команды на переход к пониженной скорости, так и для окончательной остановки. Точная остановка обеспечивается применением специальных электрических схем, одна из которых рассмотрена ниже.

ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Электропромышленностью выпускаются индуктивные датчики серии ИКВ (ИКВ-10, ИКВ-22, ИКВ-30). Работа этих датчиков основана на принципе изменения индуктивного сопротивления катушек со стальным сердечником при изменении воздушного зазора в магнитной цепи.

Рассмотрим подробно устройство и работу индуктивного датчика ИКВ-22. На стальной плите *1* (рис. 13,*а*) установлен магнитопровод *2* с двумя катушками *3*, закрытый пластмассовой крышкой *4*. С нижней стороны к плите крепятся два конденсатора *5* типа МБГП (один емкостью 10 *мкф*, 400 *в*, второй — 15 *мкф*, 200 *в*). Конденсаторы закрыты силуминовой крышкой *6*. Подключение кабеля производится через сальниковый ввод *7*.

На механизме крепится магнитный шунт *8*, размеры которого должны быть не менее: толщина — 2 *мм*, ширина — 80 *мм*, длина — 140 *мм*. Воздушный зазор между магнитопроводом и шунтом равен 6±4 *мм*. Вес датчика — 6 *кг*.

Схема включения индуктивного датчика *ИД* и выходного реле *Р* приведена на рис. 13,*б*. Выходное реле нормально включено и отключается в момент прохождения магнитного шунта над датчиком, когда из-за изменения индуктивного сопротивления катушки наступает резонанс токов и ток через обмотку реле падает.

Данные реле *Р*: тип — МКУ-48, кат. № РУ4.509.027.Д или РУ4.509.031.Д, 12 *в* переменного тока, ток втягивания не более 0,45 *а*, ток отпадания не менее 0,1 *а*.

Конденсатор C_1—15 *мкф*, 200 *в*. Конденсатор C_2—10 *мкф*, 400 *в*.

---

[1] Возможно также применение емкостных и радиоактивных датчиков.

Напряжение питания — 24 *в* переменного тока.

Принцип действия индуктивных датчиков ИКВ-10 и ИКВ-30 аналогичен описанному. Веса датчиков ИКВ-10 и ИКВ-30 равны соответственно 39,3 и 8,0 *кг*, воздушные зазоры между шунтами и сердечниками катушек равны 5—30 *мм* и 6,5 *мм*.

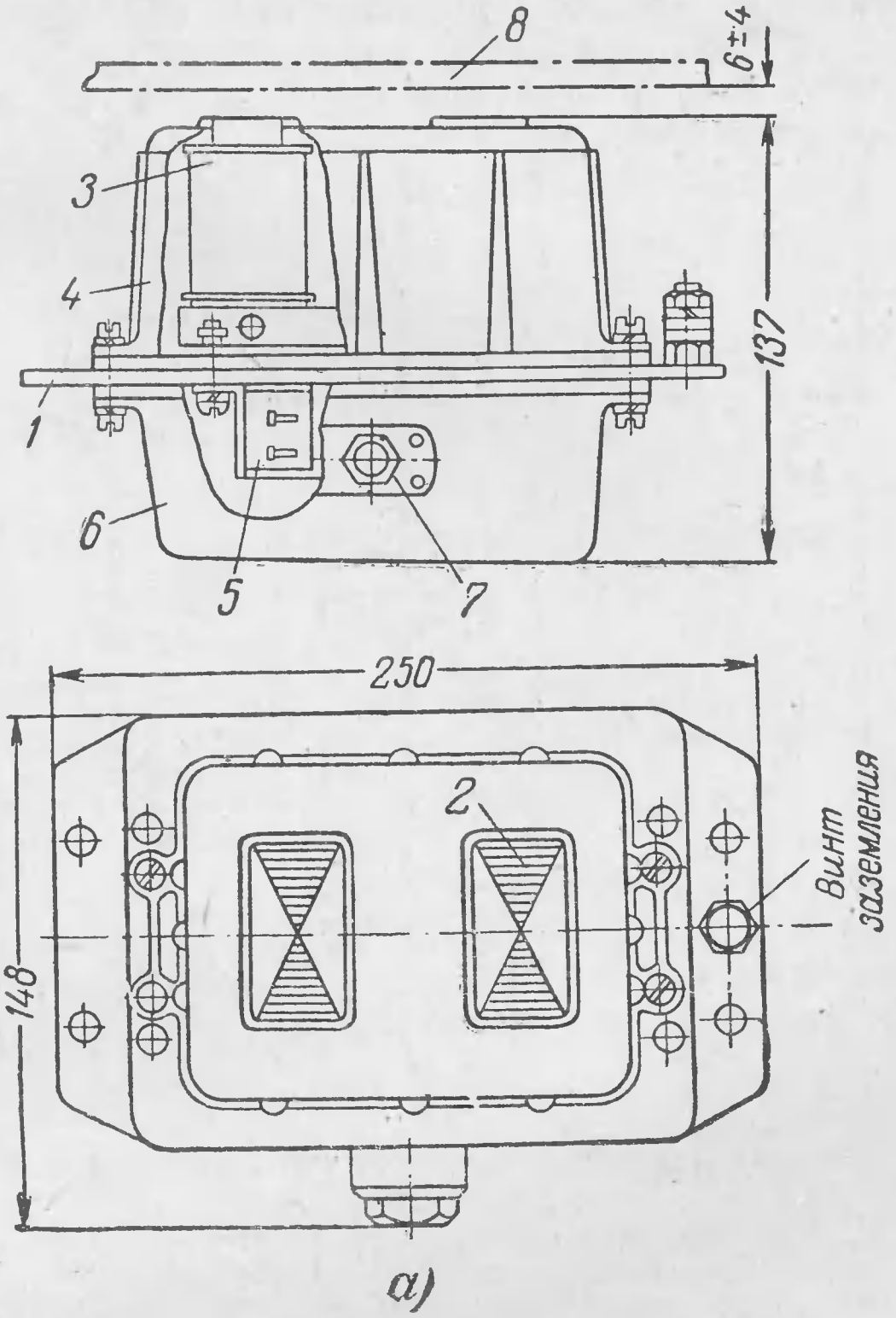


Рис. 13. Индуктивный датчик ИКВ-22.

а — конструкция; *б* — схема включения.

Размеры этих датчиков:
ИКВ-10 — 290×495×120 *мм*;
ИКВ-30 — 192×250×152 *мм*.
Для повышения чувствительности и точности работы

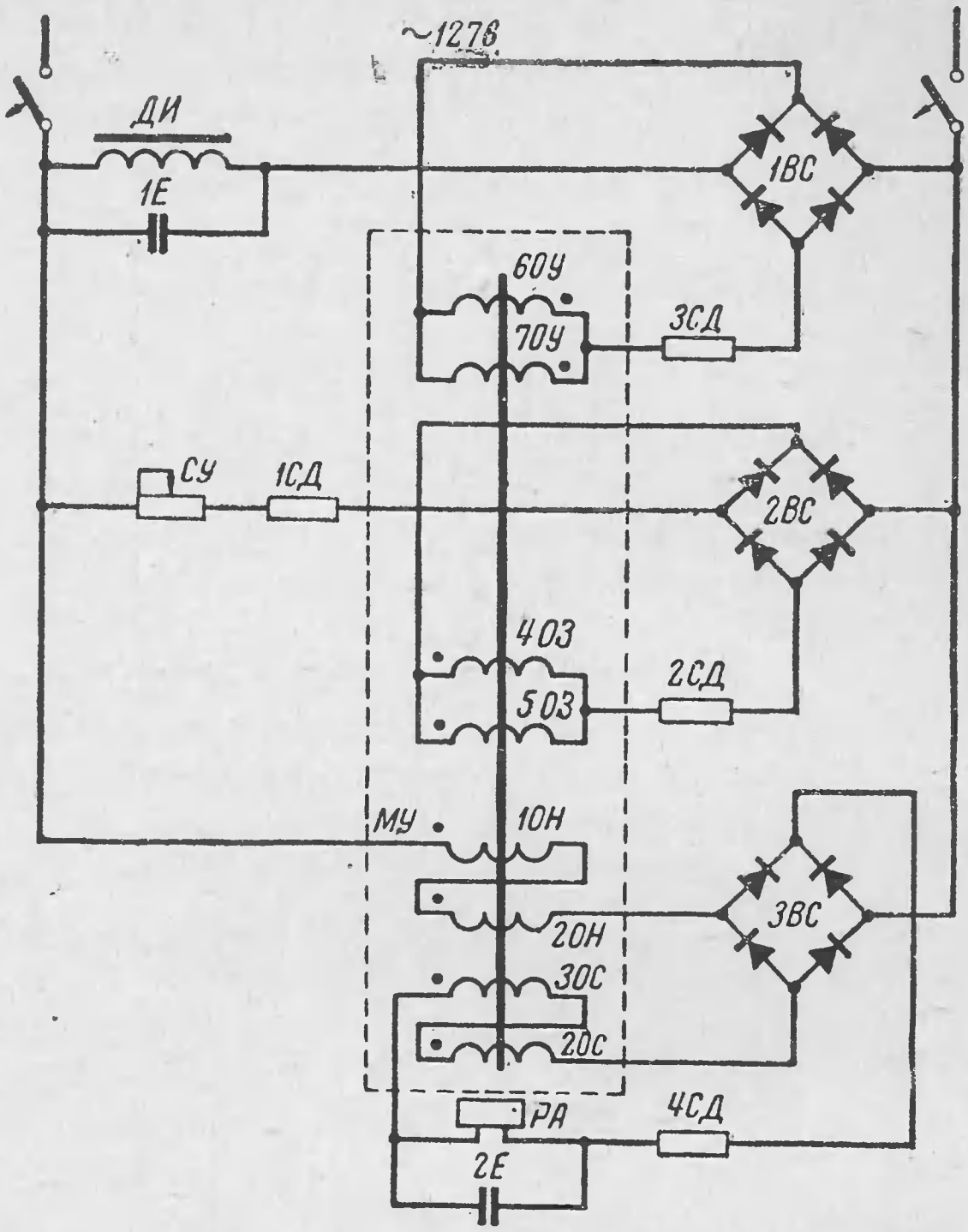


Рис. 14. Включение индуктивного датчика с магнитным усилителем.

ДИ — катушка индуктивного датчика ИКВ-10; *МУ* — магнитный усилитель ТУМ-А3-22; *РА* — выходное реле МКУ-48, 60 *в* постоянного тока; *СУ* —сопротивление установочное, 248 *ом*; *1СД—4СД* — добавочные сопротивления типа ПЭ-50: *1СД* — 500 *ом*, *2СД* — 50 *ом*, *3СД* — 35 *ом*, *4СД* — 800 *ом*; *1Е* — два конденсатора МБГП, 4 *мкф*, 200 *в*, соединенные параллельно; *2Е* — конденсатор МБГП, 2 *мкф*, 200 *в*; *1ВС*, *2ВС* — селеновые выпрямители, однофазная мостовая схема, по 1 шайбе ∅ 25 *мм* в плече; *3ВС* — то же, по 5 шайб ∅ 18 *мм* в плече.

индуктивных датчиков можно использовать магнитные усилители.

Схема включения датчика ИКВ-10 через магнитный усилитель приведена на рис. 14 (применяется серийно

выпускаемый заводом ХЭМЗ блок магнитных усилителей типа БПХ 9079-00А1).

Катушка датчика *ДИ* с параллельно подключенным конденсатором *1Е* через селеновый выпрямитель включена в цепь обмоток управления *6ОУ* и *7ОУ*. Намагничивающие силы этих обмоток действуют встречно задающему сигналу обмоток *4ОЗ* и *5ОЗ*. Выходное реле *РА* включено через селеновый выпрямитель в цепь нагрузочных обмоток магнитного усилителя *1ОН* и *2ОН*. Обмотки *2ОС* и *3ОС* служат для положительной обратной связи по току нагрузки. При отсутствии шунта над датчиком в обмотках *6ОУ*, *7ОУ* течет большой ток. Намагничивающие силы обмоток *6ОУ*, *7ОУ* и *4ОЗ*, *5ОЗ* уравновешиваются, и ток в обмотке реле *РА* мал. Реле отключено. В момент прохождения шунта над датчиком ток в цепи *6ОУ*, *7ОУ* резко падает, результирующая намагничивающая сила возрастает и реле *РА* срабатывает.

Рассмотрим, как осуществить схему точной остановки механизма с использованием индуктивных датчиков. Схема расположения датчиков для точной остановки в заданном положении *0* приведена на рис. 15,*а*. Движение к заданному положению возможно с двух сторон, поэтому устанавливаются два индуктивных датчика предварительного снижения скорости *ИПВ* и *ИПН*. Справа и слева от позиции остановки *0* располагаются датчики точной остановки *ИТВ* и *ИТН*.

В схеме управления (рис. 15,*г*) используются два реле точной остановки *РТВ* и *РТН*, включенные через выпрямительные мосты в цепи катушек индуктивных датчиков *ИТВ* и *ИТН*. Питание датчиков осуществляется от трансформатора *Тр*. Датчики шунтируются конденсаторами *СВ* и *СН*. Поляризованное реле точной остановки *РТО* включается на зажимы *а* и *б*. Реле *РТО* срабатывает, когда один из датчиков *ИТВ* или *ИТН* перекрыт магнитным шунтом (рис. 15,*а*).

Рассмотрим для примера случай движения слева направо («вперед»). Когда магнитный шунт проходит над датчиком *ИТВ*, ток в цепи этого датчика уменьшается, реле *РТВ* отпадает, а на зажимах *а—б* появляется напряжение. Размыкающий контакт *РТВ* в цепи реле *РТО* закрывается, реле *РТО* срабатывает. На рис. 15,*д* показан узел включения контактора пониженной скорости в направлении «вперед» *ВП*. Контактор *ВП* включается

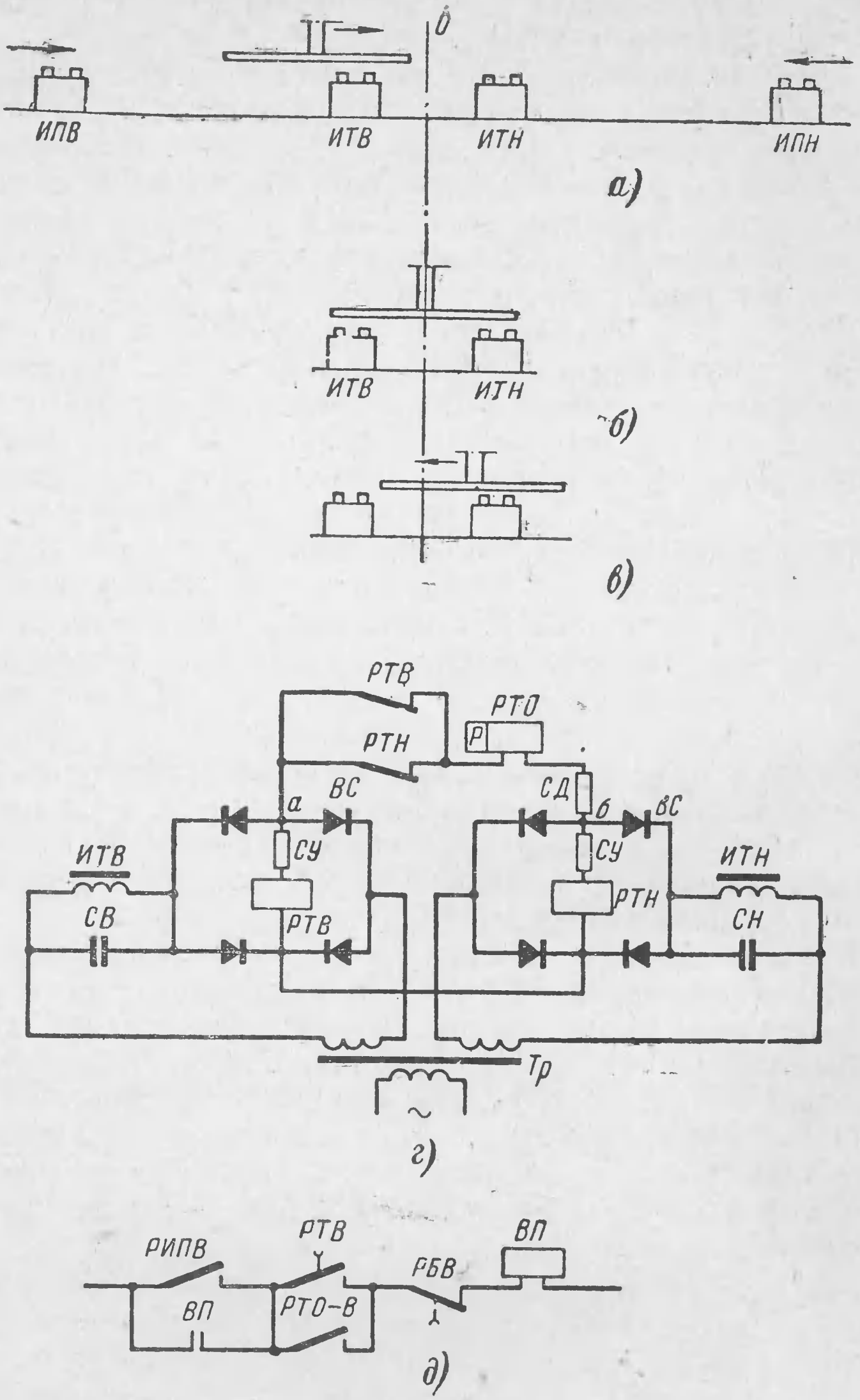


Рис. 15. Точная остановка с помощью индуктивных датчиков.

а, *б*, *в* — расположение датчиков и положения магнитного шунта; *г* — схема узла точной остановки; *д* — узел включения контактора ВП.

в момент срабатывания реле *РИПВ* индуктивного датчика *ИПВ*. При включении реле *РТО* контакт *РТО-В* замыкается, замыкающий контакт *РТВ* с выдержкой времени открывается, и контроль за точной остановкой осуществляет реле *РТО*. Когда механизм окажется в заданном положении, оба датчика — *ИТВ* и *ИТН* будут перекрыты шунтом (рис. 15,*б*). Токи в цепях катушек *ИТВ* и *ИТН* сравняются, разность потенциалов между точками *а* и *б* станет равной нулю. Реле *РТО* отпадет, контактор *ВП* отключится, и двигатель остановится.

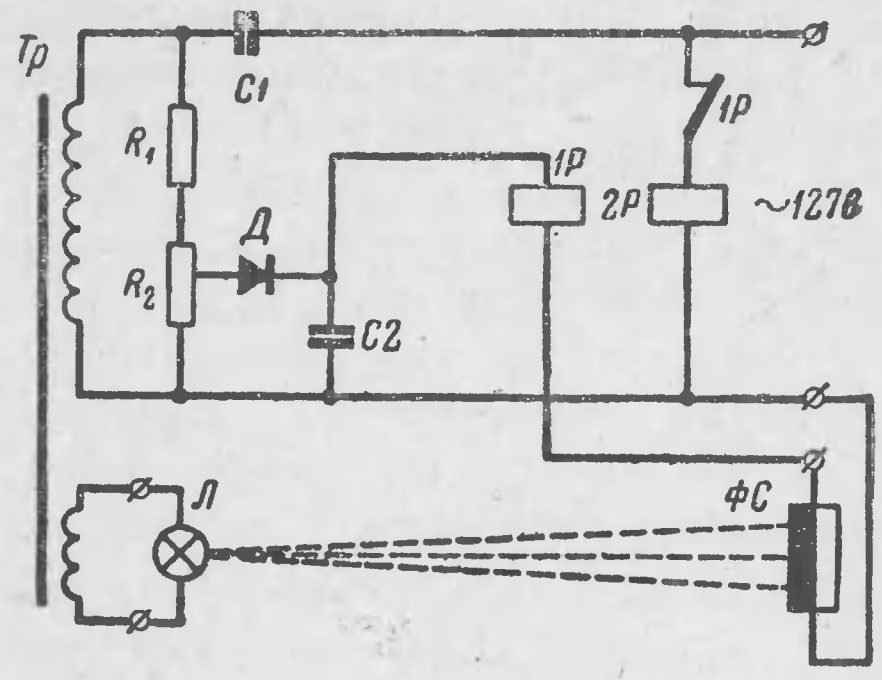
Если механизм по инерции пройдет излишний путь и шунт не будет перекрывать датчик *ИТВ* (рис. 15,*в*), сработает реле *РТВ* и отпадет реле *РТН*. На катушке *РТО* появится напряжение обратной полярности, замкнется другой контакт — *РТО—Н*, механизм на пониженной скорости включится в направлении «назад» и после прихода в заданное положение остановится (этот узел схемы на рис. 15 не показан). Ложное включение контактора *ВП* в положении рис. 15,*в* исключается блокировочным реле *РБВ*, размыкающий контакт которого открывается при подходе шунта слева к датчику *ИТН*.

Схема точной остановки, подобная описанной, с применением электромашинного усилителя используется на скоростных пассажирских лифтах. В этой схеме применяются индуктивные датчики ИКВ-30. Их катушки шунтируются емкостями по 30 *мкф* (3 конденсатора КБГ-МН, 10 *мкф*, 200 *в*, соединенные параллельно). Реле *РТВ*, *РТН* — типа РЭ 301 с катушкой на напряжение 55 *в*. *ВС* — селеновые выпрямители (однофазные мосты, по четыре последовательно соединенных элемента ∅ 100 *мм* в плече). *СУ* — установочные сопротивления для балансировки моста типа ПС 418/37. На зажимы *а—б* включается обмотка управления электромашинного усилителя. Рекомендуемый тип поляризованного реле в упрощенной схеме РП-5.

ФОТОРЕЛЕ

Для фиксации положения механизмов обычно используются фотореле с осветителями серии ФРС: ФРС-58-8, ФРС-16, ФРС-60 и ФРС-П1. Фотореле ФРС-П1 предназначено для работы в пыльных помещениях.

Светочувствительными элементами фотореле служат фотосопротивления типов ФС-А1, ФСА-Г1, ФСК-Г1 и др. Для усиления сигнала применяются электронные (ФРС-58, ФРС-16 и ФРС-П1) и магнитные (ФРС-60) усилители. Выходными аппаратами являются реле РЭ-100, контактор КП-1 или слаботочное реле МКУ-48.



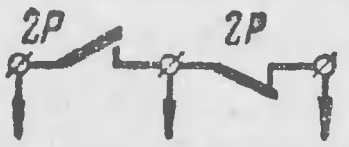


Рис. 16. Схема фотореле РФ-5.

ФС — фотосопротивление типа ФС-КП или ФС-К1; *Л* — лампа осветительная А-10, 12 *в*, 15 *св*; *1Р*, *2Р* — реле электромагнитные; *Тр* — трансформатор; *Д* — диод германиевый Д7Г; R_1 — сопротивление МЛТ, 1 *вт*, 3,6 *ком*; R_2 — сопротивление СП-2, 10 *ком*; *С1* — конденсатор МБГП, 4 *мкф*, 400 *в*; *С2* — конденсатор МБГП, 2 *мкф*, 400 *в*.

Минимальное время срабатывания фотореле равно 0,04—0,05 *сек*. Головка фотореле ФРС-58-8 имеет минимальный угол зрения 1,5°. На расстоянии 1 *м* от головки фотореле в поле зрения находится отрезок длиной 25 *мм*.

Серийно выпускаемые фотореле не могут обеспечить высокую точность фиксации положения механизма (порядка нескольких миллиметров), однако они применяются в схемах точной остановки, когда установка конечных выключателей невозможна.

Рассмотрим схему простейшего фотореле типа РФ-5, применяемого на металлорежущих станках. Фотореле состоит из трех блоков: осветителя с лампой накаливания *Л*, светочувствительной головки с фотосопротивлением *ФС* и релейного блока (рис. 16). Фотосопротивление *ФС* включено последовательно с реле *1Р* через германиевый диод *Д* на потенциометр R_1—R_2.

Под действием светового потока величина фотосопротивления уменьшается, ток в цепи реле *1Р* возрастает и реле срабатывает. Своим размыкающим контактом реле *1Р* обесточивает катушку выходного реле *2Р*. Если лучи света от осветителя не попадают на фотосопротивление, величина фотосопротивления резко возрастает, ток в цепи *1Р* падает и реле отключается. Выходное ре-

ле *2P* срабатывает. Переменное сопротивление R_2 служит для настройки четкого срабатывания реле *1P*.

Размеры: осветителя и головки — 52×105×95 *мм*; релейного блока — 160×120×215 *мм*.

5. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОНИЖЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В промышленности наиболее широко используются асинхронные электродвигатели — простые по конструкции, надежные и дешевые электрические машины. Хорошо известны способы регулирования скорости асинхронных двигателей добавочными сопротивлениями в роторе, снижением частоты тока, изменением числа полюсов статора. Для получения точной остановки первые два метода применяются редко.

Добавочные сопротивления не могут обеспечить устойчивую низкую скорость ввиду мягкости механических характеристик; при малых моментах нагрузки существенно снизить скорость невозможно.

Изменение частоты тока дает хорошие результаты. Однако для точной остановки этот метод в настоящее время применяется редко из-за необходимости установки специального преобразователя частоты. Подробнее об использовании питания током низкой частоты в схемах точной остановки см. ниже.

Многоскоростные электродвигатели с успехом применяются для получения точной остановки ряда механизмов, в частности лифтов. Однако серийно выпускаемые многоскоростные двигатели (с переключением числа полюсов обмотки статора) не имеют синхронной скорости ниже 375 *об/мин* (12,5% высокой скорости). Часто для получения высокой точности остановки этого недостаточно. Кроме того, шкала мощностей многоскоростных двигателей весьма ограничена (см. табл. 1).

Для решения задачи точной остановки электроприводов переменного тока созданы специальные схемы получения весьма низких скоростей электродвигателей. Несмотря на все разнообразие этих схем, подробно рассмотренных в настоящем разделе, общим для большинства из них является принцип регулирования скорости. Значительное снижение скорости (в некоторых схемах

в 50—100 раз) достигается использованием метода наложения тормозного момента на двигательный. Такой совмещенный режим может быть получен либо электромагнитным путем при наложении постоянного тока на переменный в обмотке статора, либо благодаря созданию внешнего тормозного момента на валу двигателя (двухдвигательный электропривод, схема с электрогидравлическим тормозом и др.).

Плохие энергетические показатели многих из этих схем (низкие к. п. д., cos φ, повышенный нагрев), в схемах точной остановки не играют роли, так как работа на пониженной скорости является кратковременной.

ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Пониженная скорость перемещения механизма легко может быть получена, если он приводится двумя двигателями (с фазными или короткозамкнутыми роторами). Каждая машина может быть выбрана примерно на 50—70% общей потребной мощности.

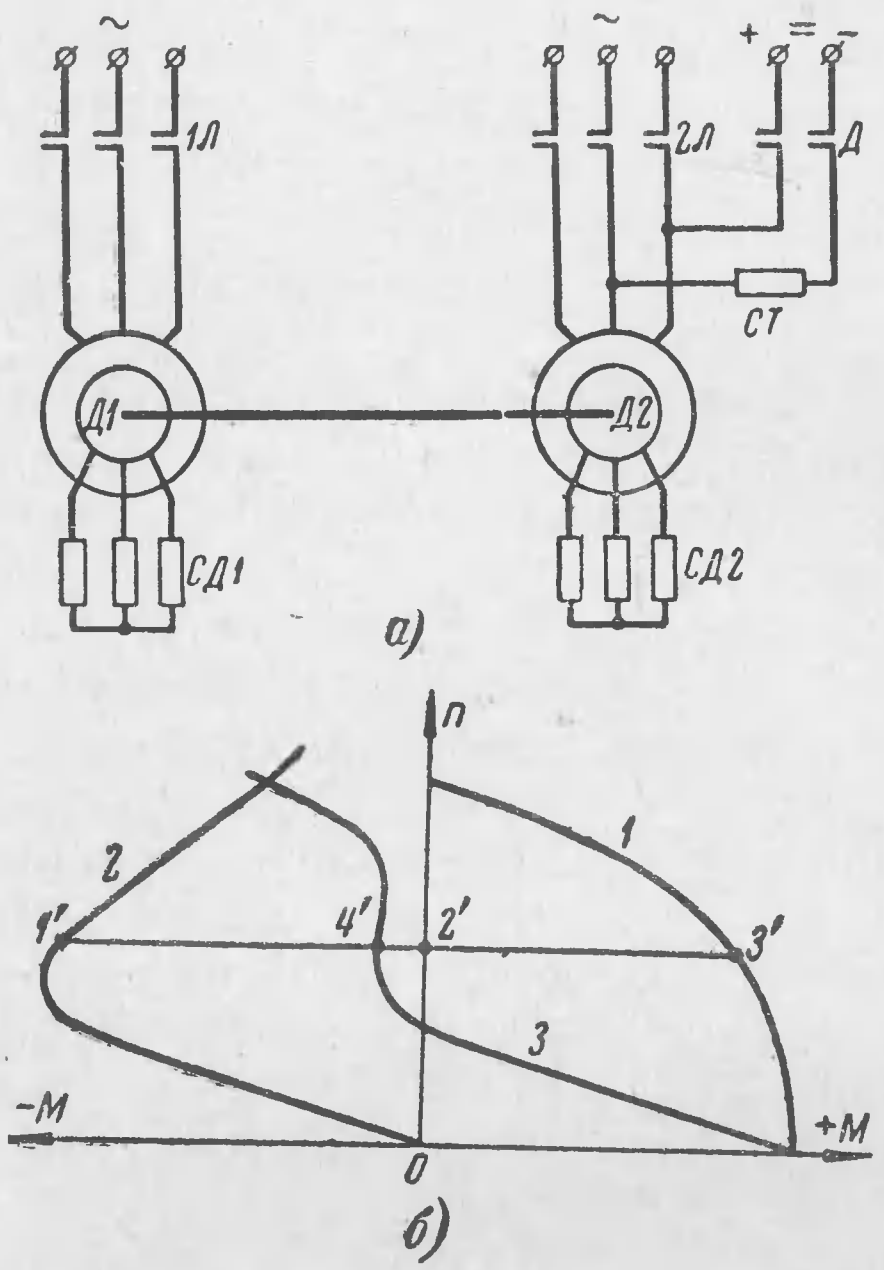


Рис. 17. Получение пониженной скорости двухдвигательного электропривода.

а — схема; б — механические характеристики.

Нормально оба двигателя *Д1* и *Д2* работают на общую нагрузку (рис. 17,*а*), включены контакторы *1Л* и *2Л*. Механическая характеристика приведена на рис. 17,*б* (кривая *1*). Для замедления электропривода перед остановкой двигатель *Д2* переводится в режим динамического торможения (характеристика *2* на рис. 17,*б*). С этой целью он отключается от сети, а в две фазы статора подается постоянный ток (включается кон-

тактор *Д*). Величина постоянного тока обычно принимается равной трехкратному току холостого хода и ограничивается добавочным сопротивлением *СТ*.

Результирующая характеристика привода *3* является суммой характеристик *1* и *2* и лежит в области низких скоростей. Построение одной из точек результирующей характеристики (точка *4′*) показано на рис. 17,*б*. При любой выбранной скорости складывают двигательный и тормозной моменты с учетом их знака (из отрезка *1′—2′* вычитается отрезок *2′—3′* и получается точка *4′* характеристики *3*).

При отсутствии достаточно мощного источника постоянного тока для динамического торможения можно двигатель *Д2* заменить машиной постоянного тока, работающей в режиме динамического торможения на сопротивление в цепи якоря. Величина этого сопротивления выбирается из условия ограничения тока в якоре машины значением не более 200—250% номинального.

Для создания тормозного момента на валу электродвигателя с целью снижения его скорости до 10—20% перед точной остановкой иногда используется вихревой тормозной генератор. Тормозной момент на валу такого генератора создается вследствие взаимодействия постоянного магнитного поля с полем вихревых токов, наводимых в стержнях и теле ротора.

Привод с вихревым тормозным генератором получил применение в отечественной и зарубежной промышленности в основном для кранов и используется для точной и безопасной установки поднимаемых деталей. Завод «Динамо» им. С. М. Кирова серийно изготавливает приводы с тормозными генераторами для строительных башенных кранов.

НАЛОЖЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПЕРЕМЕННЫЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Известно большое число схем получения пониженной скорости методом наложения постоянного тока на переменный в статоре асинхронного двигателя (короткозамкнутого или с фазным ротором).

Для создания постоянной составляющей тока проще всего использовать полупроводниковые выпрямители. На рис. 18,*а* приведена одна из простейших схем, обеспечи-

вающая получение пониженной скорости, равной нескольким процентам синхронной скорости.

Двигатель *Д* при нормальной работе на высокой скорости $n_р$ питается от сети переменного тока через контакты контактора *Л* и одного из реверсивных контакто-

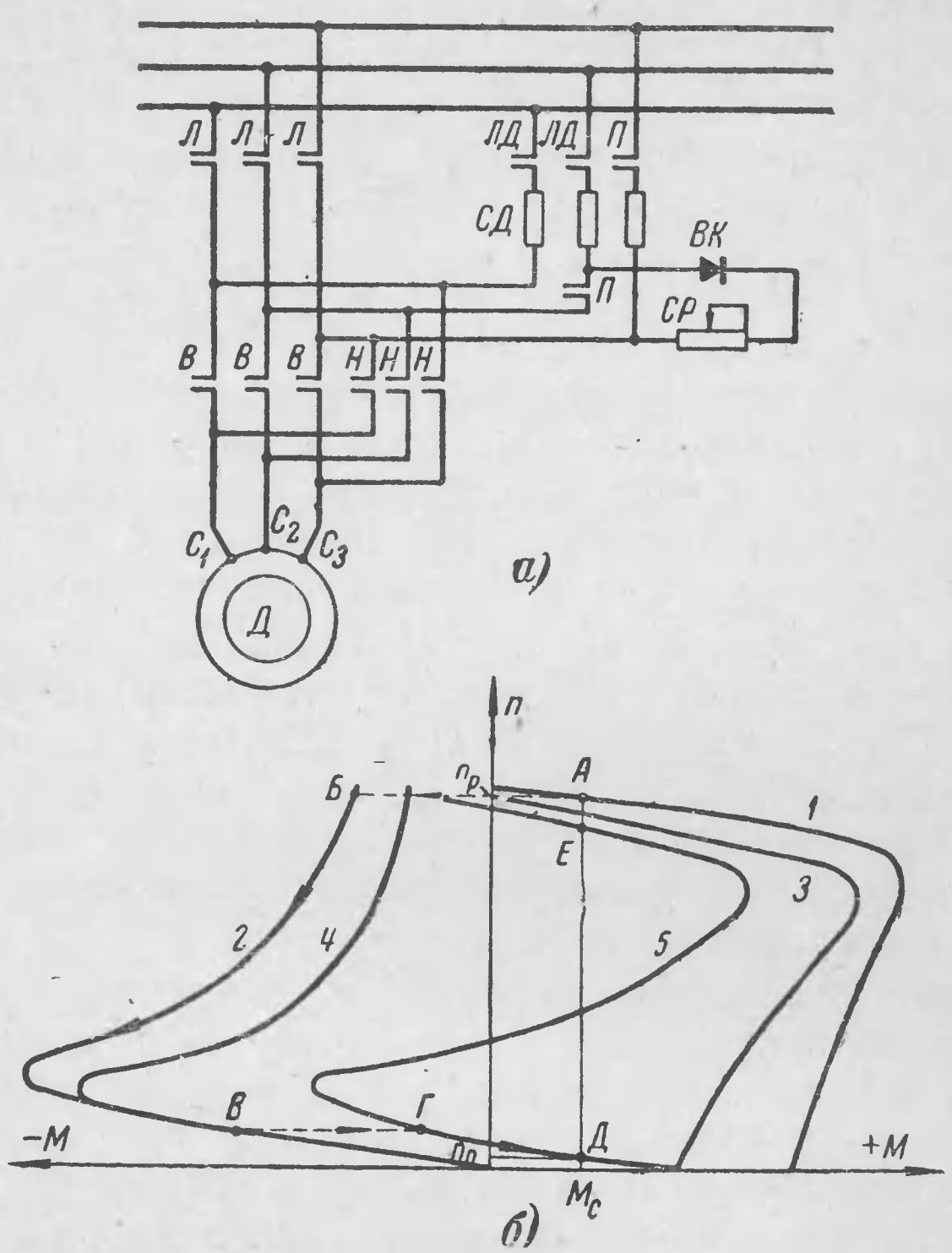


Рис. 18. Схема наложения постоянного тока на переменный в обмотке статора.

а — схема; *б* — механические характеристики.

ров *В* или *Н*. Двигатель работает на естественной характеристике *1* (рис. 18,*б*) и при статическом моменте нагрузки $M_с$ имеет скорость $n_р$ (точка *А*).

Перед точной остановкой для перехода на пониженную скорость по команде конечного или путевого выключателя отключается контактор *Л* и включается контактор *ЛД*. В две последовательно включенные фазы статора подается выпрямленный ток через вентиль *ВК*.

В этом режиме происходит динамическое торможение двигателя по характеристике *2*. Как показано стрелками, двигатель переходит из точки *А* в точку *Б* и далее тормозится до точки *В*. В этот момент срабатывает реле времени, включающее дополнительно к *ЛД* контактор *П*. Двигатель получает питание трехфазным током через добавочные сопротивления *СД*. Благодаря включению на линейное напряжение (на зажимы C_2—C_3) выпрямителя *ВК* последовательно с реостатом *СР* в фазах статора наряду с переменным током протекает постоянный ток, точнее говоря, ток имеет переменную и постоянную составляющие, так как в проводящий полупериод на добавочных сопротивлениях в статоре происходит падение напряжения и ток в статоре уменьшается. Постоянная составляющая тока дает момент динамического торможения (характеристика динамического торможения *4*), который накладывается на двигательный момент характеристики *3*. В результате совмещения двух режимов двигатель работает на характеристике *5*, являющейся суммой характеристик *3* и *4*.

После переключения двигатель из точки *В* переходит в точку *Г* и далее под действием статического момента нагрузки M_c замедляется до скорости $n_п$ (точка *Д*).

Как видно из графика рис. 18,*б*, пониженная скорость является низкой (несколько процентов) и достаточно устойчивой.

Следует помнить, что при работе на таких низких скоростях ток, протекающий в двигателе близок к пусковому, т. е. в несколько раз превышает номинальный ток. Поэтому допустима лишь кратковременная работа на пониженной скорости. Сопротивления *СД* служат также и для ограничения величины тока при работе на характеристиках *5* и *2*.

Если двигатель имеет запас по перегрузочной способности, то, увеличивая добавочные сопротивления в статоре, можно получить более низкую «ползучую» скорость, либо уменьшить постоянную составляющую тока. Если же пусковой момент, уменьшающийся в схеме наложения постоянного тока на переменный, недостаточен, можно при переходе двигателя на пониженную скорость переключать обмотку статора со звезды на треугольник. При этом подбором сопротивлений можно даже добиться получения пускового момента, большего, чем на естест-

венной характеристике. Конечно, при этом возрастает ток, однако кратковременная (до нескольких десятков секунд) токовая перегрузка допустима.

Реостат *СР* позволяет регулировать величину постоянной составляющей тока.

Выпрямитель *ВК* выполняется на селеновых, германиевых или кремниевых диодах. Количество диодов выбирается из условия допустимого обратного напряжения и тока нагрузки. Пример расчета и выбора выпрямителя приведен ниже.

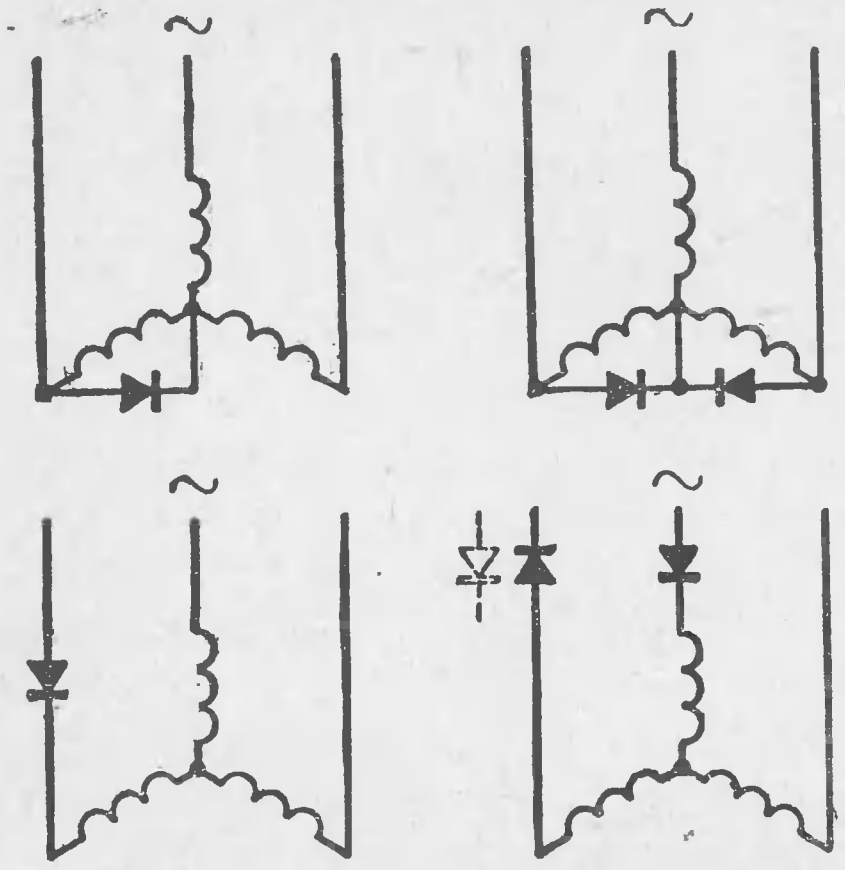


Рис. 19. Различные варианты схем наложения постоянного тока на переменный.

Предварительное снижение скорости (в режиме динамического торможения либо при выбеге под действием статического момента) необходимо, чтобы избежать работы двигателя на второй ветви регулирующей характеристики (рис. 18,*б*, точка *Е*).

Применение короткозамкнутого двигателя с повышенным скольжением (например, типа *АОС*) или двигателя с фазным ротором позволяет получить более благоприятную результирующую характеристику, которая в области высоких скоростей лежит целиком во II квадранте (рис. 20,*б*). В этом случае возможно прямое переключение на результирующую характеристику без предварительного затормаживания.

Различные модификации описанной схемы изображены на рис. 19 (добавочные сопротивления условно не показаны).

Рассмотрим схему наложения постоянного тока на переменный, используемую для мощных асинхронных двигателей шахтных подъемных машин (рис. 20,*а*). Привод осуществляется двигателем с фазным ротором *Д*. Источником постоянного тока служит отдельный генератор *Г* или сеть постоянного тока. Сопротивления $СД_1$

необходимы для ограничения утечек постоянного тока в сеть переменного тока. Дроссель *Др* ограничивает величину переменного тока в цепи генератора *Г*. При использовании двигателей с фазным ротором результирующая характеристика (рис. 20,*б*) получается менее жесткой, чем в схемах с короткозамкнутыми двигателями.

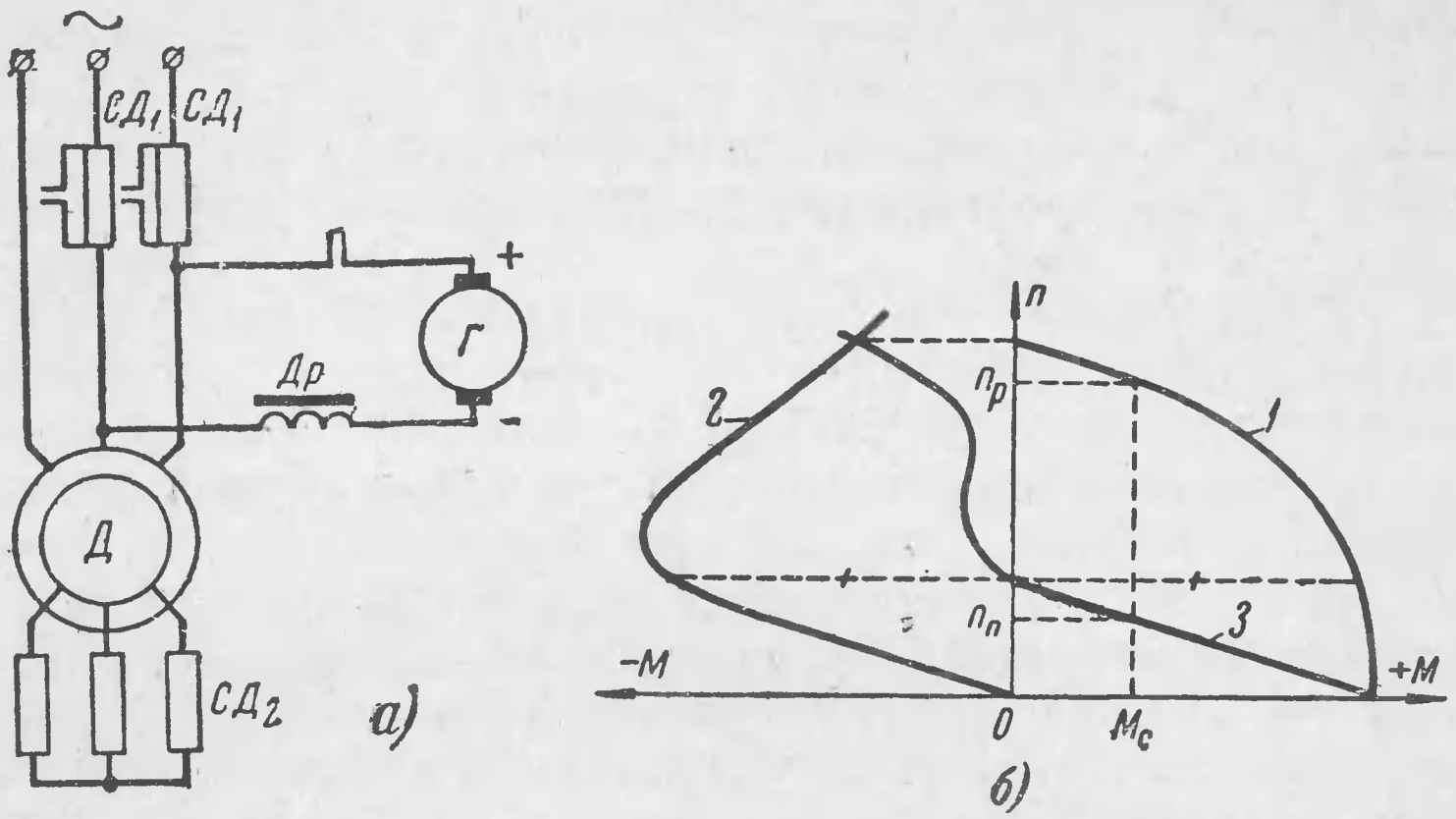


Рис. 20. Схема подачи постоянного тока в статор асинхронного двигателя шахтной подъемной машины.
а — схема; *б* — механические характеристики.

Общим недостатком простых схем по рис. 18, 19 является вибрация ротора при низкой скорости, сопровождающаяся шумом. Вибрация нежелательна при наличии зубчатых передач. Основной причиной возникновения вибраций ротора является наличие в электродвигателе несимметричного магнитного потока.

Для ликвидации вибраций при работе на «ползучей» скорости необходимо создать в машине круговое вращающееся магнитное поле и иметь постоянный магнитный поток, равномерно распределенный по окружности статора.

Рассмотрим практически применяемую для двигателей единой серии А, АО безвибрационную схему получения «ползучей» скорости.

Симметричная безвибрационная схема. Для исключения вибраций при пониженных скоростях необходимо обеспечить равенство переменных составляющих токов, дающих круговое вращающееся магнитное поле, а также

одинаковый по величине и направлению постоянный ток во всех трех фазах статора. Разработан ряд безвибрационных схем, обеспечивающих выполнение указанных требований [Л. 8].

Рассмотрим одну из безвибрационных схем, отличающуюся наиболее гибким регулированием (рис. 21,*а*). Между началами обмоток фаз, *a*, *b*, *c* и концами обмоток фаз *c*, *a*, *b* включены выпрямители *ВК*, последовательно с регулировочными сопротивлениями R_1. Последовательно с каждой из фазных обмоток статора включаются сопротивления R_2, служащие для регулировки переменного тока.

В каждой фазе статора наряду с переменным протекает постоянный ток. Величина этого тока регулируется сопротивлениями R_1. Так как выпрямители *ВК* одинаково направлены и образуют треугольник, в линейных проводах постоянные токи взаимно уничтожаются.

Отсутствие постоянного тока в питающей сети является преимуществом симметричной схемы рис. 21,*а* по сравнению с описанными выше несимметричными схемами (рис. 18, 19). Это свойство используется на практике для достижения симметричности схемы. При наладке в линейные провода включаются амперметры постоянного тока с нулем в середине шкалы. При полной симметрии все амперметры показывают нуль.

Механические характеристики (рис. 21,*б*) в области низких скоростей являются достаточно жесткими. Характеристики построены для различных значений сопротивлений R_1 и R_2. Из характеристик видно, что с увеличением постоянного тока (уменьшение R_1) скорость вращения двигателя уменьшается.

Упрощенная симметричная схема приведена на рис. 21,*в*. В качестве выпрямителей *ВК* могут быть использованы различного типа полупроводниковые диоды.

Краткие сведения о полупроводниковых выпрямителях. Наиболее широко в промышленности используются в настоящее время селеновые, германиевые и кремниевые выпрямители.

Селеновые вентили на стальной основе допускают максимальное амплитудное значение обратного напряжения на одном вентиле — 20—25 *в*, а на алюминиевой основе — до 30—35 *в*. Среднее значение длительно допустимого тока на один вентиль:

Размер вентиля, *мм*	Ток, *а*	Размер вентиля, *мм*	Ток, *а*
∅ 35	0,15	60×60	0,6
∅ 45	0,3	75×75	1,2
∅ 60	0,6	90×90	1,5
∅ 75	1,2	100×100	2,0
∅ 100	1,5	100×200	4.0
40×40	0,3	100×300	6,0
		100×400	8,0

Допустима кратковременная перегрузка токами, в несколько раз превышающими указанные токи длительного режима.

Силовые германиевые диоды типов Д302—Д305 выпускаются на токи 1, 3, 5, 10 *а* и обратные напряжения соответственно 200, 150, 100 и 50 *в*. Диоды серии ВГ с воздушным охлаждением допускают нагрузки 5, 10, 30, 50 и 100 *а* и обратные напряжения до 150 *в* (вентиль ВГ-5 — до 300 *в*). Выпускаются также вентили с водяным охлаждением ВГВ на токи 200, 500 и 1 000 *а* и обратное напряжение до 100 *в*.

При последовательном включении нескольких диодов каждый диод шунтируется сопротивлением для равномерного распределения обратного напряжения. Величины сопротивлений выбираются такими, чтобы ток в них был равен двукратному значению обратного тока диода.

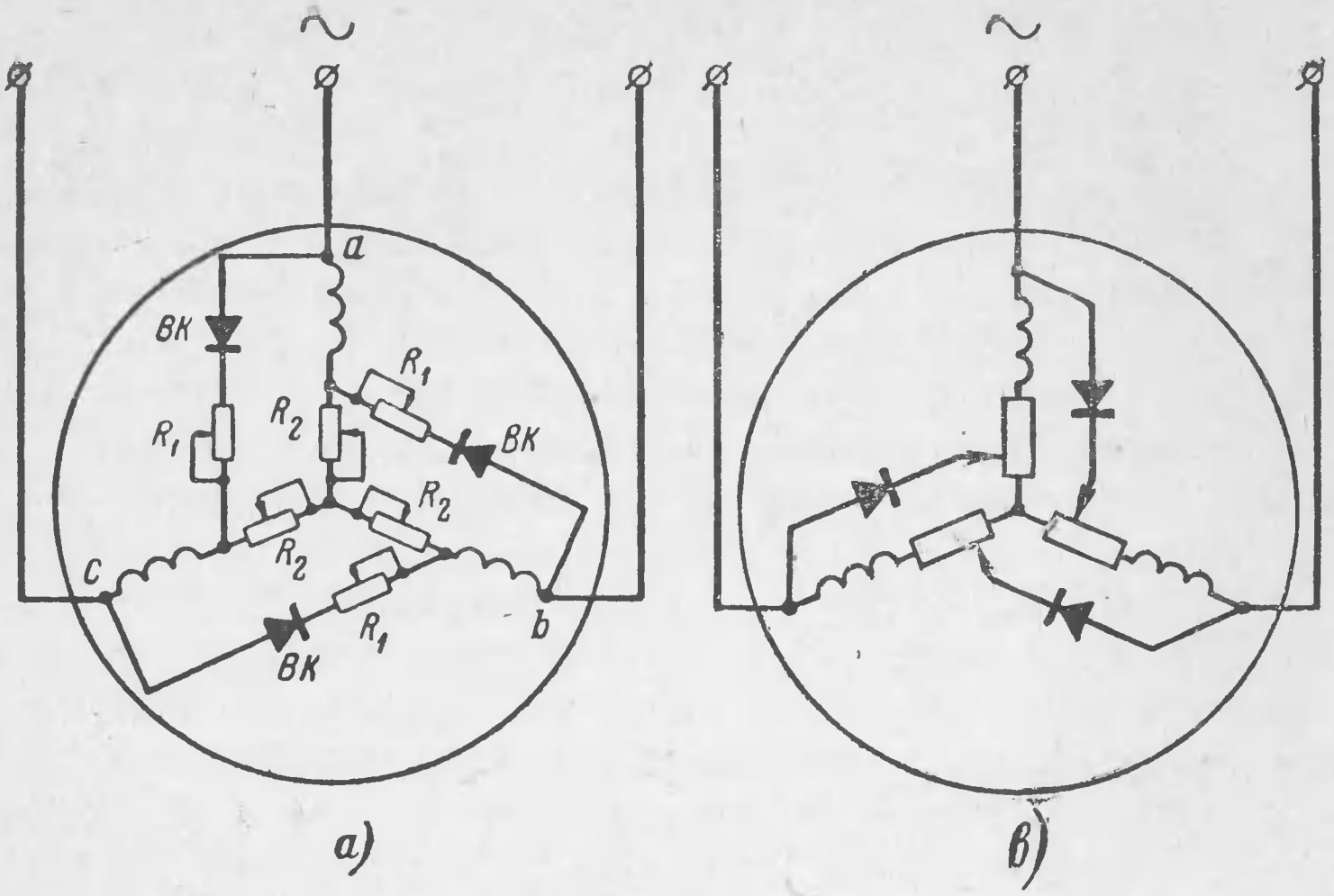
Промышленностью выпускаются силовые кремниевые диоды серий ВК, ВКД и ПВК на токи 10, 50, 100 и 200 *а*, обратные напряжения до 600 *в*. Вес вентиля на 200 *а* без радиатора равен 250 *г*.

Для защиты кремниевых диодов от внезапного повышения обратного напряжения каждый из них обычно шунтируется цепочкой *R—C* (активное сопротивление — емкость).

Так, например, диоды ПКВ-50 шунтируются последовательно соединенными сопротивлением 30 *ом* и емкостью 4 *мкф*.

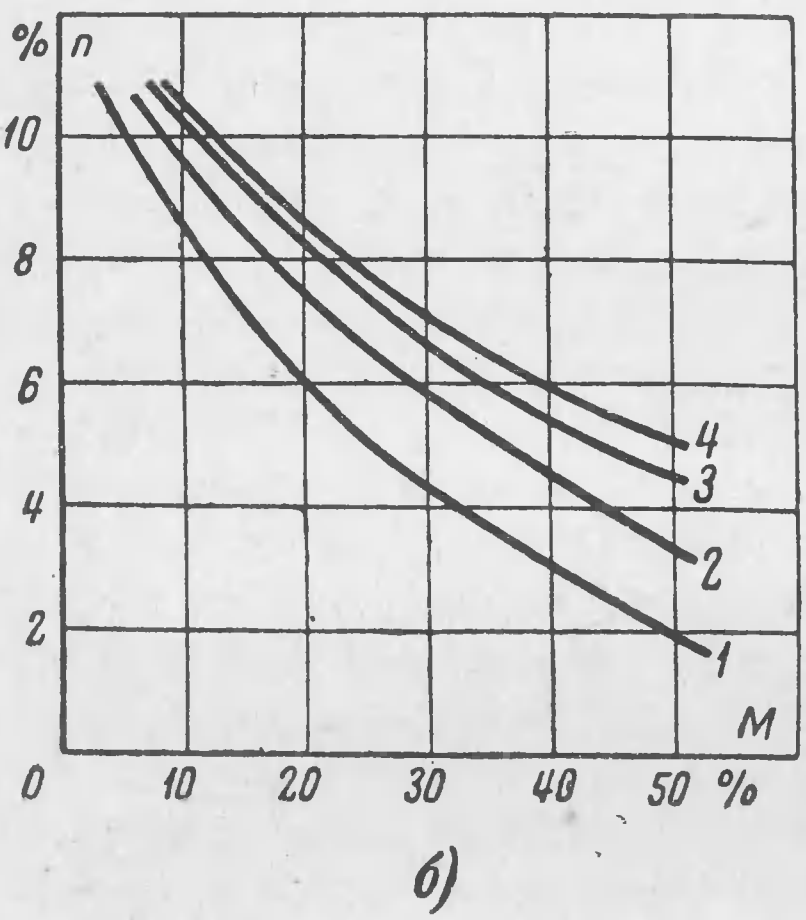
В случае последовательного соединения двух и более диодов каждый из них шунтируется также сопротивлениями для равномерного распределения обратного напряжения (аналогично германиевым вентилям).

Для защиты германиевых и кремниевых выпрямителей от коротких замыканий используются специальные быстродействующие плавкие предохранители и автоматические выключатели.



а)

в)



б)

Рис. 21. Безвибрационная симметричная схема получения пониженной скорости.

а — схема; *б* — механические характеристики; *в* — упрощенный вариант симметричной схемы.
1 — $R_1=0$, $R_2=10\,R_ф$; *2* — $R_1=2\,R_ф$, $R_2=5\,R_ф$; *3* — $R_1=5\,R_ф$; $R_2=2\,R_ф$; *4* — $R_1=10\,R_ф$, $R_2=0$, $R_ф$ — сопротивление фазы статора.

Пример 3. Рассмотрим упрощенную методику расчета и выбора сопротивления и выпрямителей для безвибрационной схемы рис. 21,*а*.

Для примера выберем электродвигатель АО 32-4; его номинальная мощность $P_н=1{,}0$ *квт*, напряжение $U_н=380$ *в*, скорость $n_н=1410$ *об/мин*, номинальный ток $I_н=2{,}4$ *а*, пусковой ток $I_к=5I_н=12$ *а*.

Сопротивление R, равное сумме R_1+R_2, находится по формуле

$$R = 0{,}22\frac{U_н}{I_н} = 0{,}22\frac{380}{2{,}4} = 34{,}8\ ом.$$

Выбор ящика сопротивлений производится по длительному току, эквивалентному по перегреву кратковременному току $I_п$, протекающему через сопротивления [Л. 3].

Примем, что время работы на ползучей скорости равно 10 *сек*, режим работы на низкой скорости кратковременный, а при нормальной работе на высокой скорости сопротивления током не обтекаются. Ток $I_п$ можно считать равным пусковому току: $I_п = I_к = 12\ а$.

По таблице сопротивлений [Л. 3, табл. 5-10] находим среднюю постоянную времени T ящика сопротивления предполагаемого типа. $T = 175\ сек$. Далее по отношению времени включения к постоянной времени $\frac{t_р}{T} = \frac{10}{175} = 0{,}057$ находим из кривой $\frac{I_{эп}}{I_р} = f\left(\frac{t_р}{T}\right)$ [Л. 3, рис. 5-6] отношение эквивалентного по перегреву тока $I_{эп}$ к рабочему току $I_р$, равному в нашем случае $I_р = I_к = 12\ а$,

$$\frac{I_{эп}}{I_р} = 0{,}23, \quad I_{эп} = 0{,}23 \cdot 12 = 2{,}77\ а.$$

По этому току и величине сопротивления $R = 34{,}8\ ом$ выбирается ящик сопротивлений ЯСЗ с 11 элементами по 12 *ом*, 5,4 *а*. Для каждой фазы используется по 3 элемента.

Соотношение между сопротивлениями R_1 и R_2 устанавливается при наладке; можно при этом руководствоваться данными, приведенными на рис. 21,*б*.

Для выбора селеновых выпрямителей необходимо найти число последовательно и параллельно включенных шайб. Примем допустимую кратность перегрузки селенового выпрямителя при работе в течение 10 *сек* $K_I = 5$.

Расчетное значение тока

$$I_{расч} = \frac{I_к}{2K_I} = \frac{12}{2 \cdot 5} = 1{,}2\ а.$$

Выбираем селеновые шайбы диаметром 100 *мм* на ток 1,5 *а*. Число последовательно соединенных шайб в каждой фазе

$$n = 1{,}2 \cdot \frac{U_л}{U_{доп}} = 1{,}2 \cdot \frac{380}{18} = 26,$$

где $U_л$ — линейное напряжение;

$U_{доп} = 18\ в$ — допускаемое обратное напряжение на 1 шайбу;

1,2 — коэффициент запаса.

СХЕМА С ФИКСАЦИЕЙ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Предложенная А. С. Сандлером схема электрической фиксации путем подачи постоянного тока в статорную и роторную обмотки позволяет получить очень высокую точность остановки без необходимости большого предварительного снижения скорости, что связано с увеличением постоянной составляющей тока. Величина пониженной скорости перед окончательной остановкой может быть принята порядка 20%.

Схема электрической фиксации показана на рис. 22. При работе на высокой скорости включены контакторы *1Л*, *2Л* и *3Л*. Перед окончательной остановкой двигатель переводится на пониженную скорость. Контакторы *1Л* и *3Л* отключаются, включается контактор *П*. В цепи статора и ротора вводятся добавочные сопротивления *СДС* и *СДР*, на линейное напряжение параллельно двум фазам статора включается выпрямитель *ВК*. Получается описанная выше схема наложения тормозного момента на двигательный.

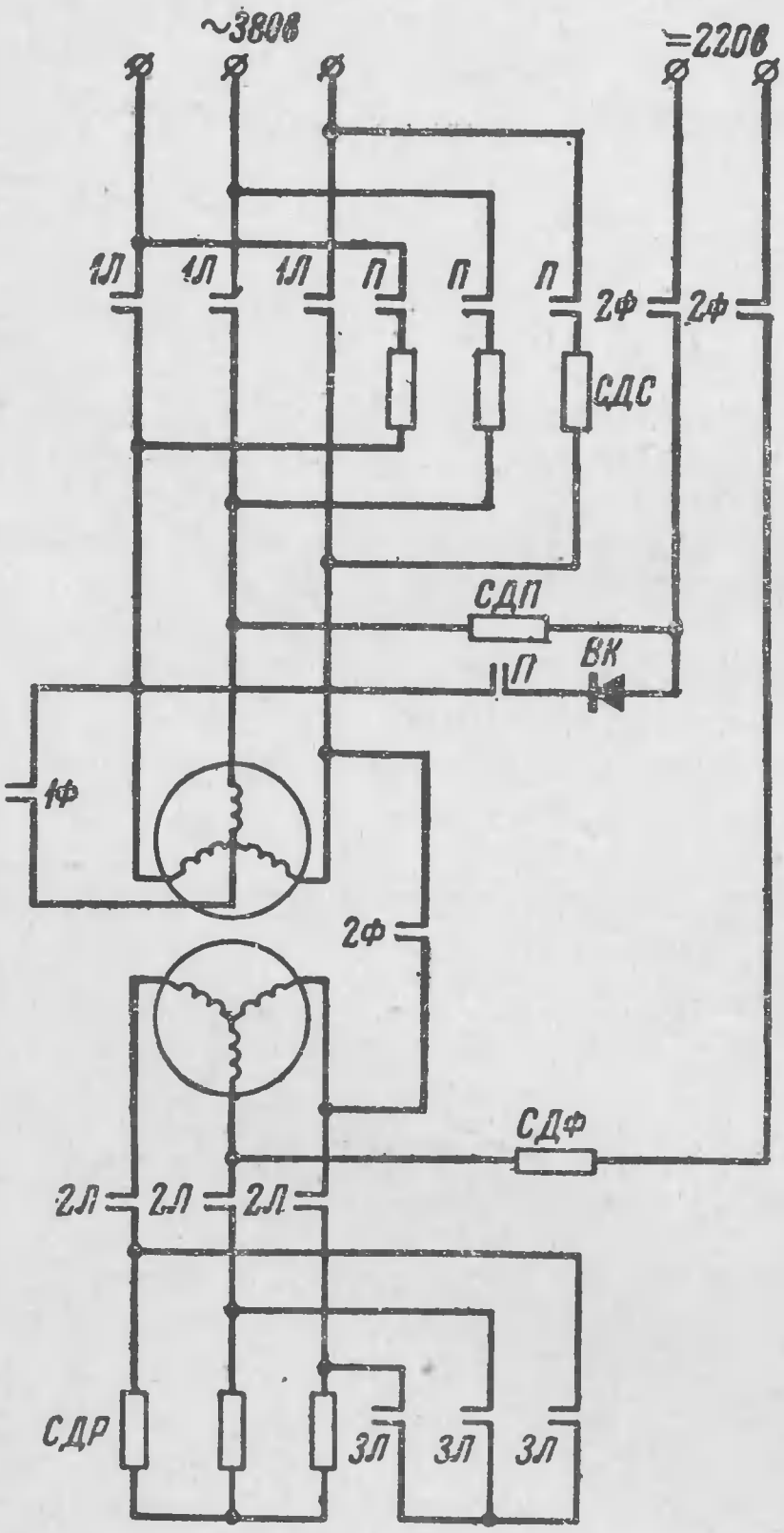


Рис. 22. Схема электрической фиксации.

При подходе механизма на пониженной скорости к заданному положению по команде конечного выключателя точной остановки отключаются контакторы *П* и *2Л* и включаются контакторы *1Ф* и *2Ф*. В последовательно включенные две статорные и две роторные обмотки подается постоянный ток от сети или вспомогательного по-

лупроводникового выпрямителя (кремниевого, селенового, германиевого и т. п.). Величина постоянного тока выбирается примерно равной $I_н$ и регулируется с помощью сопротивлений *СДФ* и *СДП*.

Под действием образовавшегося постоянного магнитного поля полюсы ротора притягиваются к соответствующим полюсам статора и ротор останавливается в строго фиксированном положении. Контактор *1Ф* закорачивает третью свободную фазу статорной обмотки, служащую демпфером для исключения колебаний ротора около положения точной остановки.

После окончания фиксации контакторы *1Ф* и *2Ф* отключаются.

НАЛОЖЕНИЕ ТОРМОЗНОГО МОМЕНТА НА ДВИГАТЕЛЬНЫЙ В ДВУХСКОРОСТНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

Многоскоростные асинхронные электродвигатели серий АО, МТКВ (МТКМ), КО и Т широко применяются в промышленности для получения низкой рабочей скорости и для предварительного замедления электропривода с целью повышения точности остановки. Однако эти серийно выпускаемые двигатели не имеют низкой скорости менее 12,5% от высокой скорости.

В табл. 1 приведены значения максимальных мощностей двигателей и отношений чисел полюсов обмоток статора при работе на низкой и высокой скоростях $p_н/p_в$.

Таблица 1

Тип двигателя	АО		МТКВ, МТКМ			КО	Т		
$\frac{p_н}{p_в}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{16}{6}$	$\frac{20}{6}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{8}{2}$	$\frac{12}{2}$	$\frac{16}{2}$
Максимальная мощность при высокой скорости, *квт*	55,0	36,0	2,2	11,0	22,0	32,0	6,0	4,5	4,5

Из таблицы видно, что у серийных двигателей мощностью более 5 *квт* нельзя получить путем переключения обмоток статора низкую скорость менее 25—30%.

В тех случаях, когда для повышения точности остановки необходима более низкая скорость, не выше 1—3%, можно использовать метод совмещения двигательного и тормозного режимов в электрической машине [1].

С этой целью в одну из обмоток статора (обмотку высокой скорости) подается постоянный ток от сети или индивидуального выпрямителя для создания тормозного момента, соответствующего режиму динамического торможения. Вторая обмотка включается на сеть переменного тока.

На рис. 23,*а* приведена схема включения двухскоростного двигателя для получения «ползучей» скорости, а на рис. 23,*б* показаны механические характеристики двигателя для различных способов его включения.

Во время рабочего хода на высокой скорости включен контактор *Л2*, подключающий к сети переменного тока обмотку *II* (с меньшим числом полюсов). Двигатель работает на характеристике *2*. При моменте нагрузки M_c скорость равна $n_р$. Для замедления электропривода отключается контактор *Л2* и включается контактор *Л3*. В последовательно включенные обмотки двух фаз статора подается постоянный ток от выпрямителя *ВС*, и двигатель переходит в режим динамического торможения по характеристике *3* (как показано стрелками).

Величина постоянного тока должна быть приблизительно равна трехкратному току холостого хода включаемой обмотки. Сопротивление *СТ* служит для получения требуемого значения постоянного тока.

В конце торможения включается контактор *Л1*. При этом дополнительно к работающей обмотке *II* на сеть включается обмотка *I*. Происходит наложение двигательного и тормозного режимов, в результате чего двигатель переходит на характеристику «ползучей» скорости *4*, являющуюся суммой характеристики двигательного режима при низкой скорости *1* и тормозной характеристики *3*. При моменте M_c ротор двигателя вращается со скоростью $n_п$.

Построение этой результирующей характеристики легко выполняется путем сложения с учетом знака моментов на характеристиках *1* и *3* для нескольких значений скорости вращения. Как видно из рис. 23,*б*, суммар-

---

[1] Схема предложена А. С. Сандлером.

ная результирующая характеристика дает стабильную низкую скорость.

Для окончательной остановки двигателя вновь отключается обмотка *1* и происходит динамическое тормо-

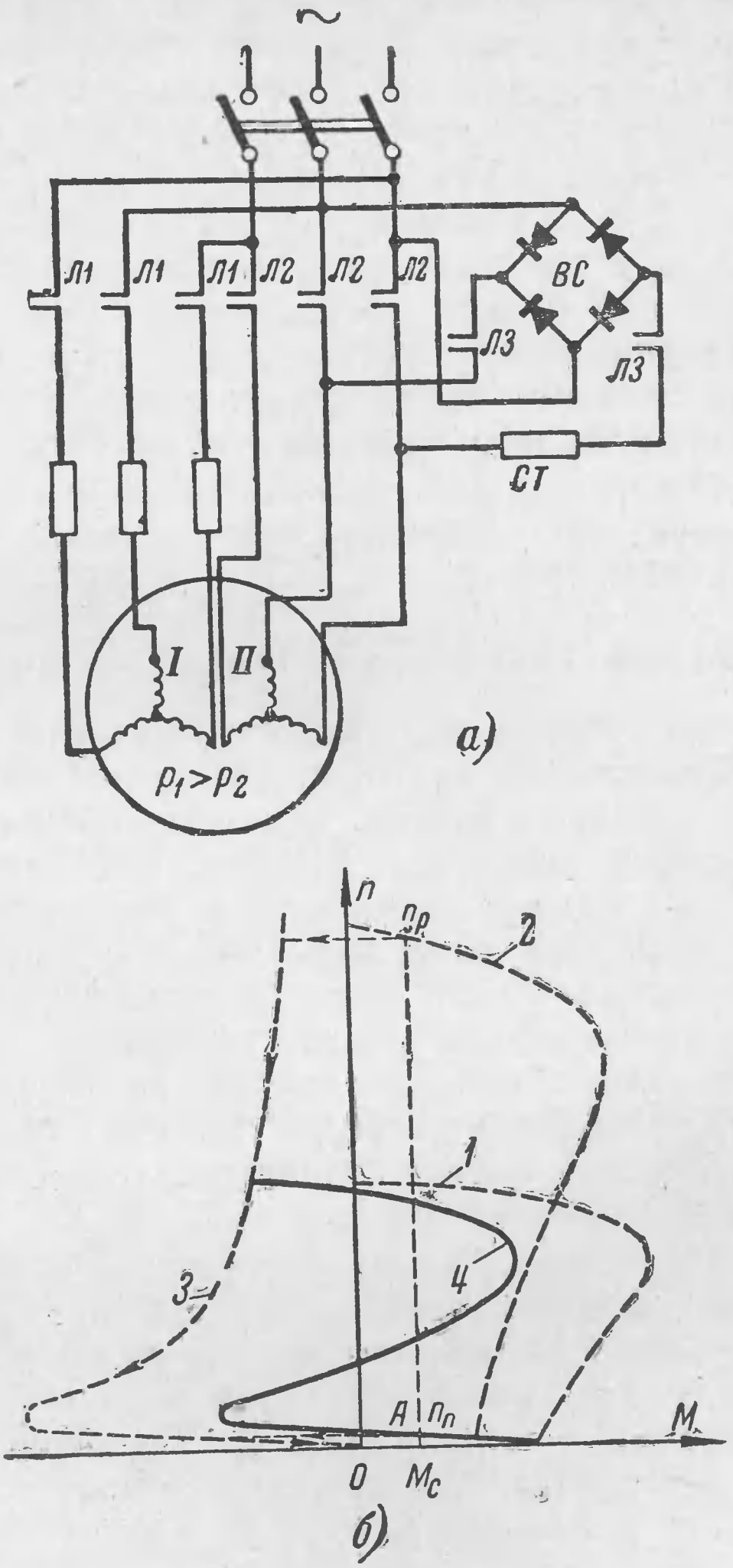


Рис. 23. Получение «ползучей» скорости вращения многоскоростного асинхронного двигателя.

а — схема; *б* — механические характеристики.

жение с «ползучей» скорости до полной остановки (переход из точки *А* в точку *0* показан стрелками).

Получаемая в описанной схеме очень низкая скорость обеспечивает высокую точность остановки электропривода. При исследованиях этой схемы на двигателе мощностью 0,75 *квт* была получена точность остановки $\pm(5 \div 8)°$ на валу двигателя при изменении статического момента нагрузки на 50% и колебаниях напряжения питающей сети на ±10% [Л. 4].

Как и в других аналогичных схемах совмещения двигательного и тормозного режимов в короткозамкнутых двигателях, при низкой скорости токи близки к пусковым. Добавочные сопротивления в статоре служат для некоторого снижения тока. Однако одновременное уменьшение максимального момента на характеристике низкой скорости может быть нежелательным (при большом моменте нагрузки). Низкая скорость должна использоваться кратковременно.

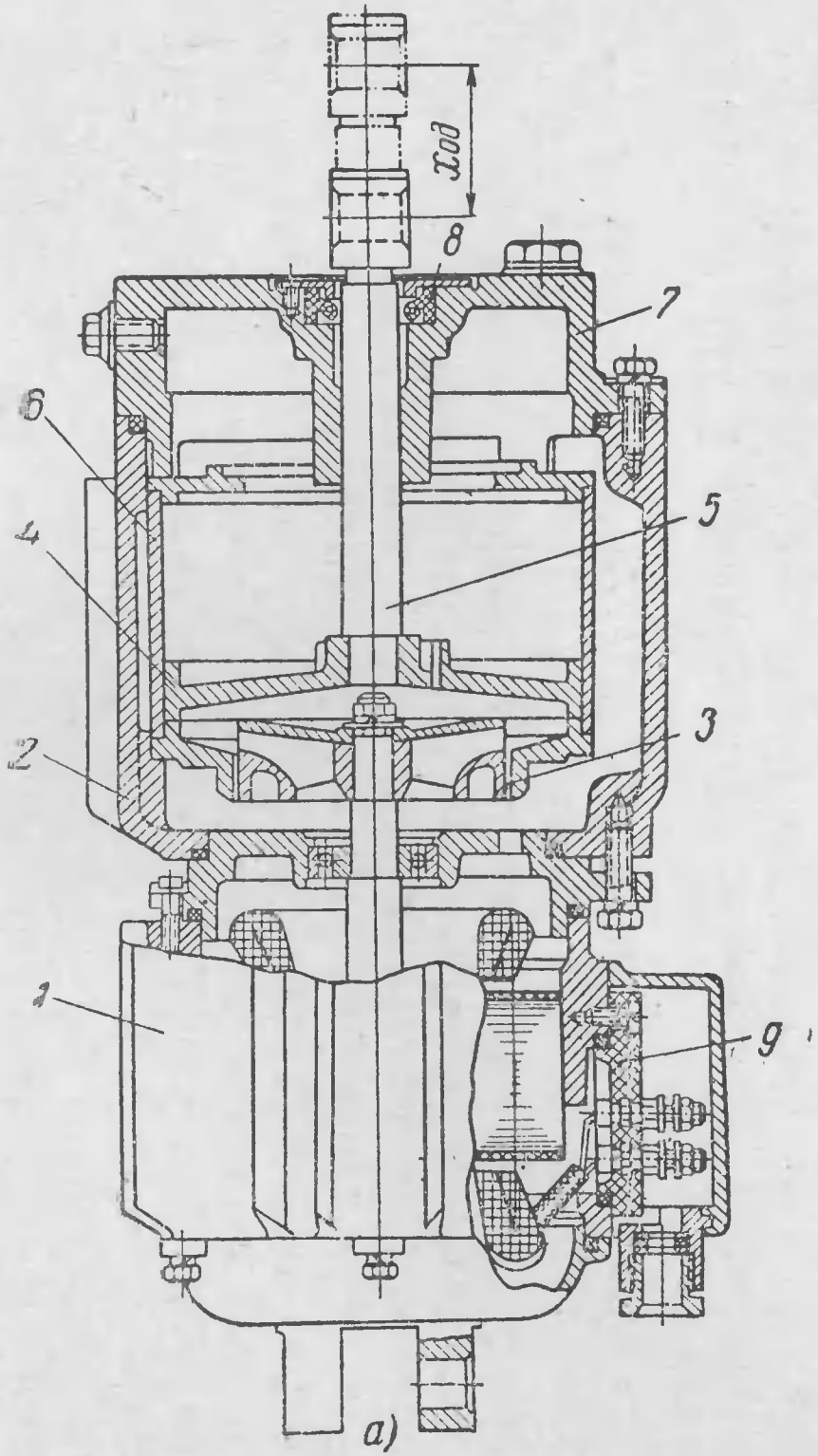
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТОРМОЗА

Одной из простых и легко осуществимых систем получения пониженной скорости вращения для механизмов легкого режима работы является привод с электрогидравлическим тормозом. В последние годы колодочные тормоза с однофазными электромагнитами переменного тока типа ТКТ стали вытесняться тормозами, у которых растормаживание колодок происходит под действием электрогидравлического толкателя.

На рис. 24,*а* приведен разрез гидротолкателя со встроенным электродвигателем; на рис. 24,*б* показана установка гидротолкателя с пристроенным сверху двигателем на колодочном тормозе.

Как видно из рис. 24,*а*, электрогидравлический толкатель состоит из двигателя *1*, погруженного в масло, корпуса толкателя *2*, в котором находятся лопасти центробежного насоса *3*, вращаемого электродвигателем, поршня *4* со штоком *5* и цилиндра *6*. Закрывается корпус крышкой *7*. Конец штока выведен наружу через уплотнение *8*. Для подключения кабеля служит коробка зажимов *9*.

При включении двигателя масло нагнетается под поршень. Поршень вместе со штоком поднимается



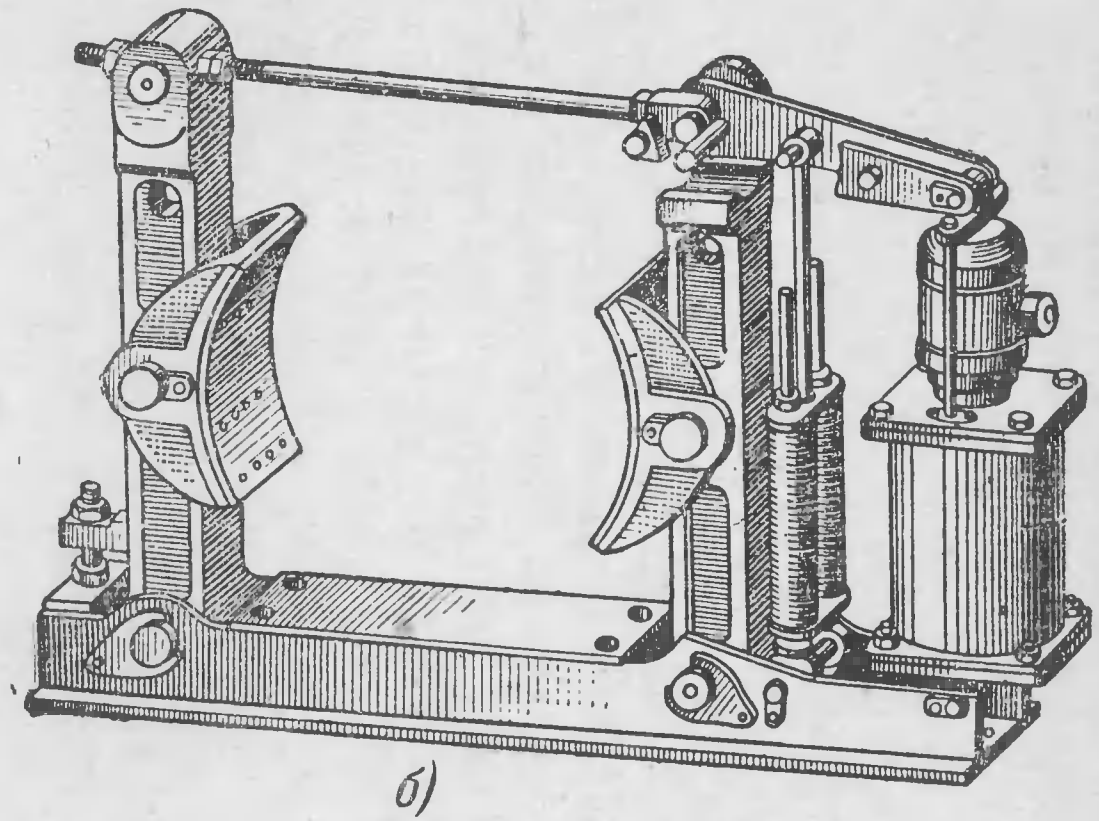


Рис. 24. Тормоз с электрогидравлическим толкателем.

а — конструкция электрогидравлического толкателя; *б* — установка гидротолкателя на колодочном тормозе.

в верхнее положение; шток действует на траверсу тормоза, и колодки освобождают тормозной шкив. При выключении двигателя центробежный насос останавливается, поршень со штоком опускается. Масло, находящееся под поршнем, вытесняется через каналы в корпусе к нижней части центробежного колеса. Колодки тормоза прижимаются к тормозному шкиву.

Быстродействие тормоза велико (доли секунды). Для регулировки скорости подъема или опускания штока гидротолкателя служит дроссельный клапан.

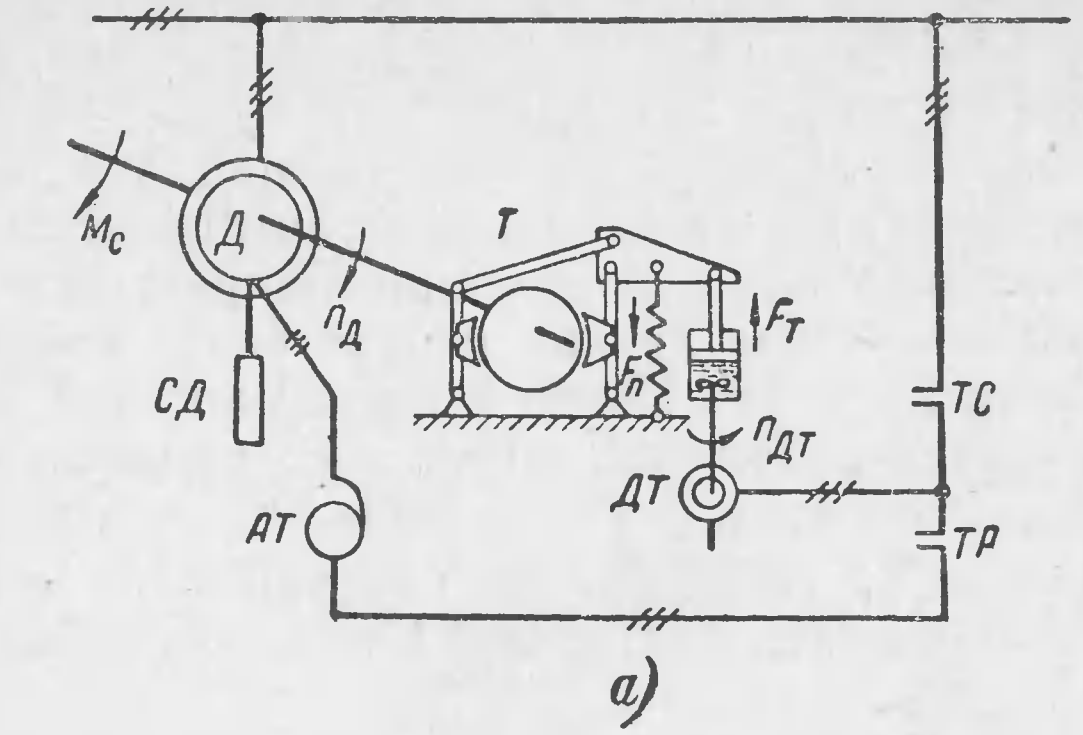
Промышленностью серийно выпускаются колодочные тормоза с электрогидравлическими толкателями типов ТКТГ и ТТ. Они допускают до 720 включений в час, надежны в работе. Мощность двигателя гидротолкателя равна 50—400 *вт* (в зависимости от размера тормоза).

С помощью электрогидравлического тормоза электродвигатель с фазным ротором перед остановкой может быть переведен на пониженную скорость. На рис. 25,*а* в однолинейном изображении дана схема включения главного, приводного двигателя *Д* и двигателя гидротолкателя *ДТ* и поясняется принцип работы электропривода.

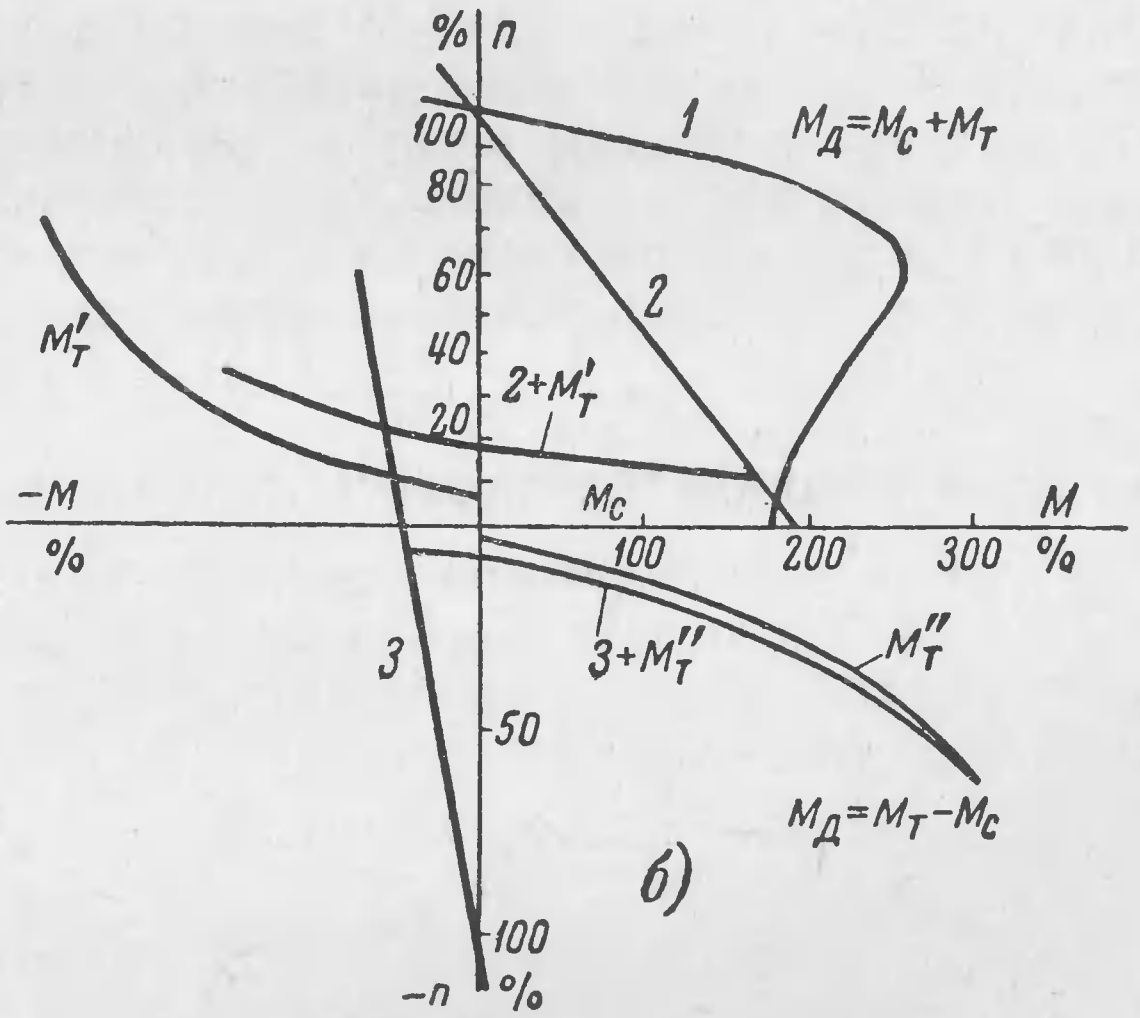
При включении двигателя гидротолкателя в цепь статора главного двигателя (контактором ТС) тормоз *Т* работает аналогично электромагнитному. Двигатель *ДТ* развивает скорость и момент, достаточные для создания на поршне гидротолкателя усилия $F_т$, преодолевающего усилие пружины $F_п$. Колодки тормоза растормаживаются, и вал главного двигателя *Д* освобождается. *СД* — пусковое и добавочное сопротивление в роторе двигателя *Д*.

Для получения пониженной скорости привода двигатель гидротолкателя контактором *ТР* включается в цепь ротора главного двигателя. Напряжение и частота тока на двигателе *ДТ* при этом меняются обратно пропорционально скорости вращения привода $n_д$. Когда скорость главного двигателя равна нулю, напряжение и частота тока ротора максимальны. Двигатель *ДТ* вращается на полной скорости. Колодки тормоза отпущены. С ростом скорости двигателя *Д* напряжение и частота тока уменьшаются, усилие на гидротолкателе падает, и под действием пружины колодки тормоза начинают прижиматься к шкиву, создавая тормозной момент.

На рис. 25,*б* во II и IV квадрантах построены характеристики зависимости тормозного момента $M'_т$ и $M''_т$ от скорости главного двигателя n, а также естественная



а)



б)

Рис. 25. Получение низкой скорости в схеме с электрогидравлическим тормозом.
а — схема; *б* — механические характеристики.

(*1*) и реостатные (*2* и *3*) характеристики двигателя. Результирующие характеристики привода находятся, как это было показано выше, суммированием характеристик двигателя *2* и *3* с тормозными характеристиками $M'_т$ и

$M''_т$. Как видно из рис. 25,*б*, результирующие характеристики привода являются жесткими и позволяют получить пониженную скорость порядка 10—20% номинальной. Для регулирования скорости в сторону снижения нужно увеличить первоначальное сжатие пружины или снизить напряжение на двигателе *ДТ*.

Описанная схема привода очень проста. Дополнительная аппаратура — маломощный автотрансформатор *АТ*, используемый для согласования напряжений и подрегулировки величины низкой скорости, и контакторы переключения *ТС* и *ТР*. Износ и нагрев колодок при относительно кратковременных периодах включения привода на пониженную скорость не являются чрезмерными.

Привод с электрогидравлическим тормозом особенно выгодно использовать для точной остановки опускаемых грузов.

Если для привода механизма применен короткозамкнутый двигатель, то для питания двигателя тормоза можно использовать специальный датчик частоты — небольшой двигатель с фазным ротором, связанный с валом главного двигателя. Приводы с электрогидравлическими толкателями для получения низких скоростей применяются на кранах, некоторых металлургических механизмах.

ПИТАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТОКОМ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

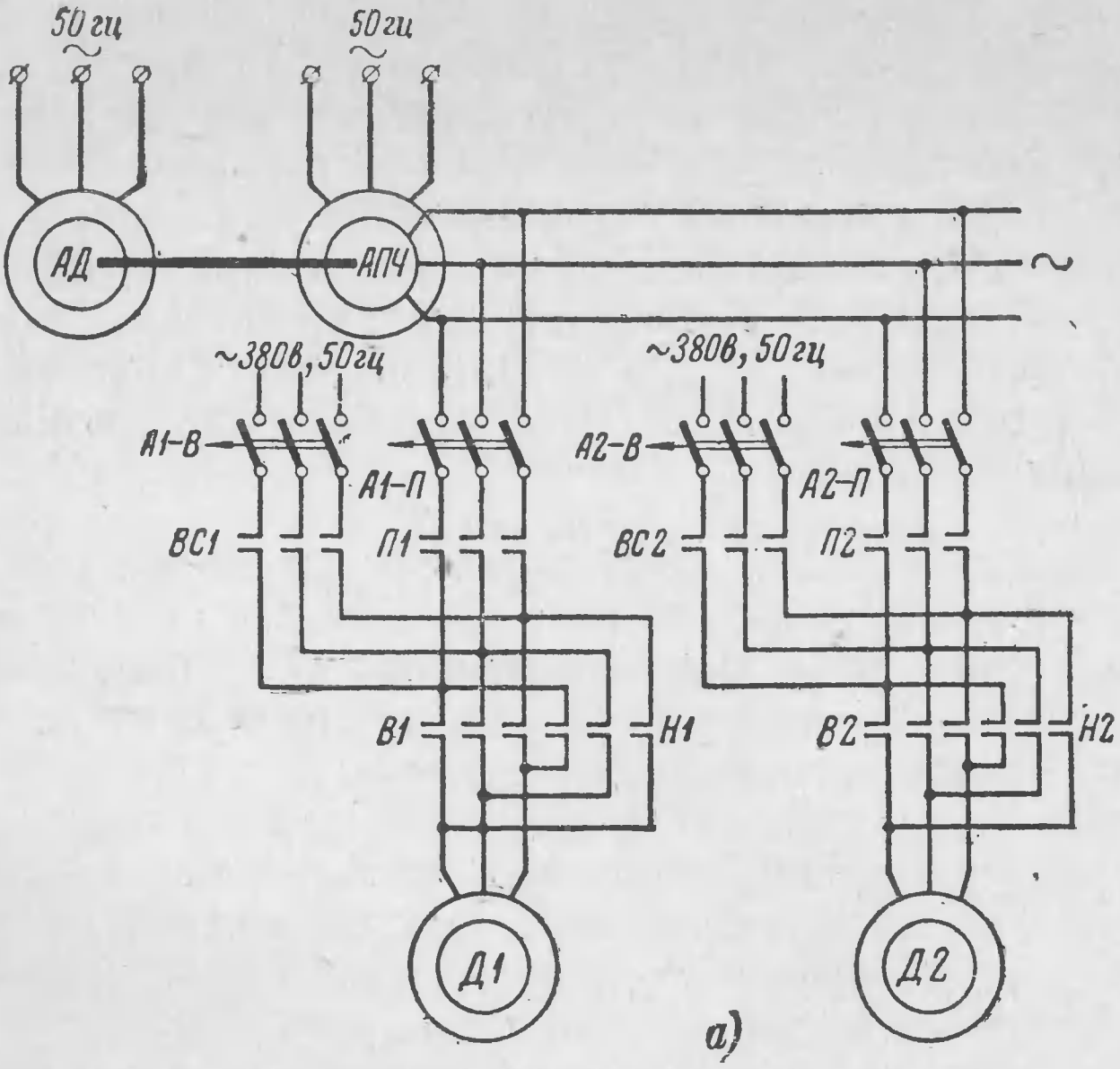
Одним из способов получения пониженной скорости вращения асинхронного двигателя является питание током низкой частоты. Как известно, синхронная скорость вращения n_c прямо пропорциональна частоте тока:

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

где f — частота,

p — число пар полюсов.

Для получения низкой частоты обычно используются электромашинные преобразователи. Применение такого преобразователя для получения точной остановки электроприводов является оправданным лишь в тех случаях, когда имеется много механизмов с асинхронными двигателями, скорость которых необходимо снижать либо для точной остановки, либо по другим технологическим тре-



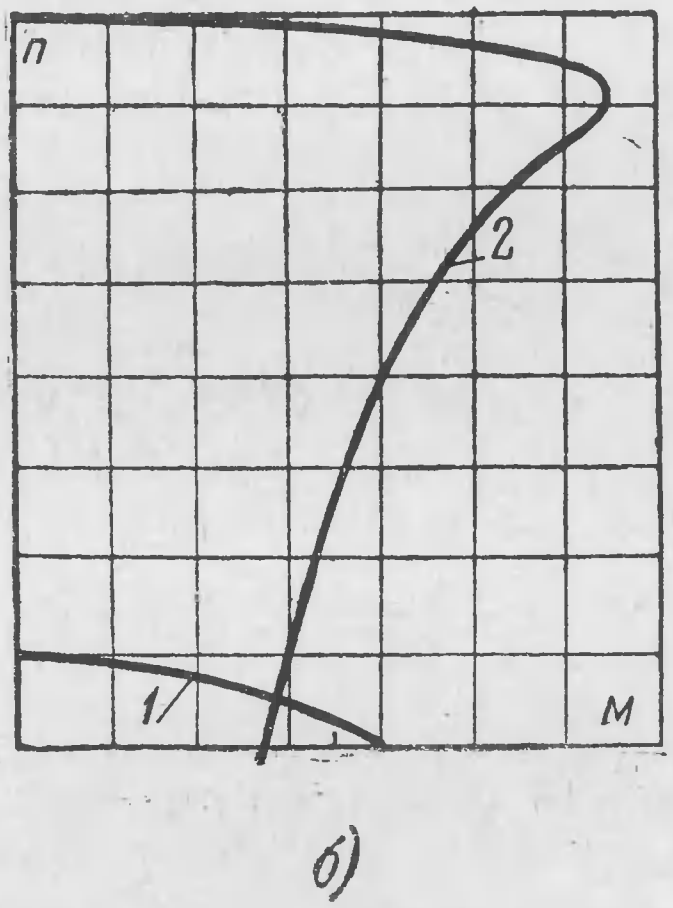


Рис. 26. Использование асинхронного преобразователя частоты.

а — схема; *б* — механические характеристики.

бованиям. Самым простым и дешевым является асинхронный двухмашинный преобразователь частоты, состоящий из приводного короткозамкнутого двигателя и трехфазной электрической машины с фазным ротором. Такой преобразователь нетрудно собрать в любом цехе.

На рис. 26,*а* показана схема асинхронного преобразователя частоты. Приводной двигатель *АД* вращает асинхронную машину *АПЧ*. Напряжение U_2 и частота тока в роторе машины *АПЧ* f_2 прямо пропорциональны скольжению s, равному

$$s = \frac{n_c - n}{n_c},$$

где n_c — синхронная скорость машины АПЧ, определяемая числом пар полюсов p и частотой сети f_1;

n — скорость вращения ее ротора;

$$U_2 = E_{2к} s = \frac{E_{2к}(n_c - n)}{n_c};$$

$$f_2 = f_1 s = \frac{f_1(n_c - n)}{n_c};$$

$E_{2к}$ — напряжение на кольцах при неподвижном роторе.

Если выбрать шестиполюсную машину *АПЧ* (n_c = = 1 000 *об/мин*), а приводной двигатель *АД* взять восьмиполюсный ($n \cong 730$ *об/мин*), то частота тока в роторе *АПЧ* будет равна:

$$f_2 \cong \frac{f_1(1\,000 - 730)}{1\,000} = 0{,}27 f_1.$$

Более низкую частоту можно получить, используя восьмиполюсный преобразователь *АПЧ* и десятиполюсный приводной двигатель. В этом случае

$$f_2 \cong \frac{f_1(750 - 570)}{750} = 0{,}24 f_1.$$

Для перевода рабочих двигателей *Д1*, *Д2* и т. д. на пониженную скорость они отключаются от сети и подключаются к ротору *АПЧ* (рис. 26,*а*). Для переключения служат контакторы высокой скорости *ВС1*, *ВС2*, ... и низкой скорости $П_1$, $П_2$, ...

Таким образом, снижение скорости вращения двигателей более чем в 4 раза легко осуществимо при использовании обычных стандартных электрических машин.

Механическая характеристика двигателя при питании током низкой частоты приведена на рис. 26,*б* (кривая *1*). Там же для сравнения показана естественная характеристика *2*. Характеристика низкой скорости является жесткой, что необходимо для получения стабильной пониженной скорости. Пусковой момент двигателей падает с уменьшением частоты, так как напряжение на кольцах падает сильнее, чем частота. Для увеличения пускового момента достаточно применить повышающий трансформатор.

Мощность, снимаемая с колец *АПЧ*, пропорциональна частоте тока. Это позволяет брать приводной двигатель меньшей установленной мощности; при специальном изготовлении мощность преобразователя АПЧ также уменьшается. Так, например, на некоторых зарубежных кранах используются одноякорные преобразователи, дающие частоту 6 *гц* для получения точной остановки при опускании грузов. Мощность преобразователя составляет 25% мощности двигателя подъема.

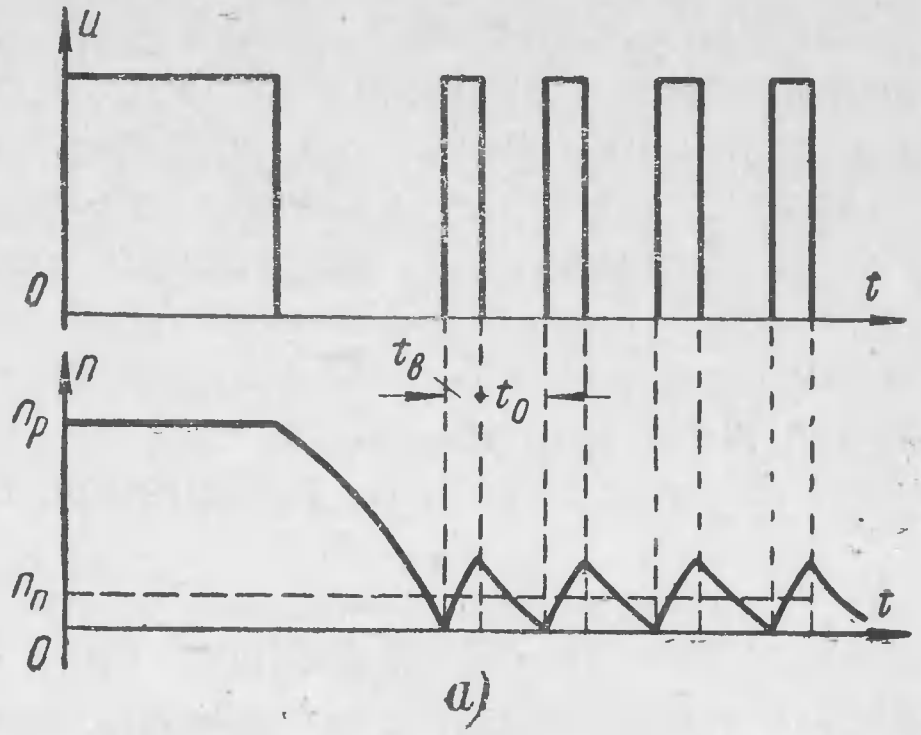
В отличие от рассмотренных выше схем наложения тормозного момента на двигательный для получения низкой скорости, питание током низкой частоты не приводит к большим токам и перегреву двигателей даже при продолжительной работе на низкой скорости. Это является большим достоинством описанного способа регулирования.

При включении машин *АД* и *АПЧ* в сеть необходимо следить, чтобы направления вращения ротора *АД* и магнитного поля *АПЧ* совпадали. В противном случае вместо снижения частоты можно ошибочно получить частоту тока в 1,5—2 раза выше нормальной.

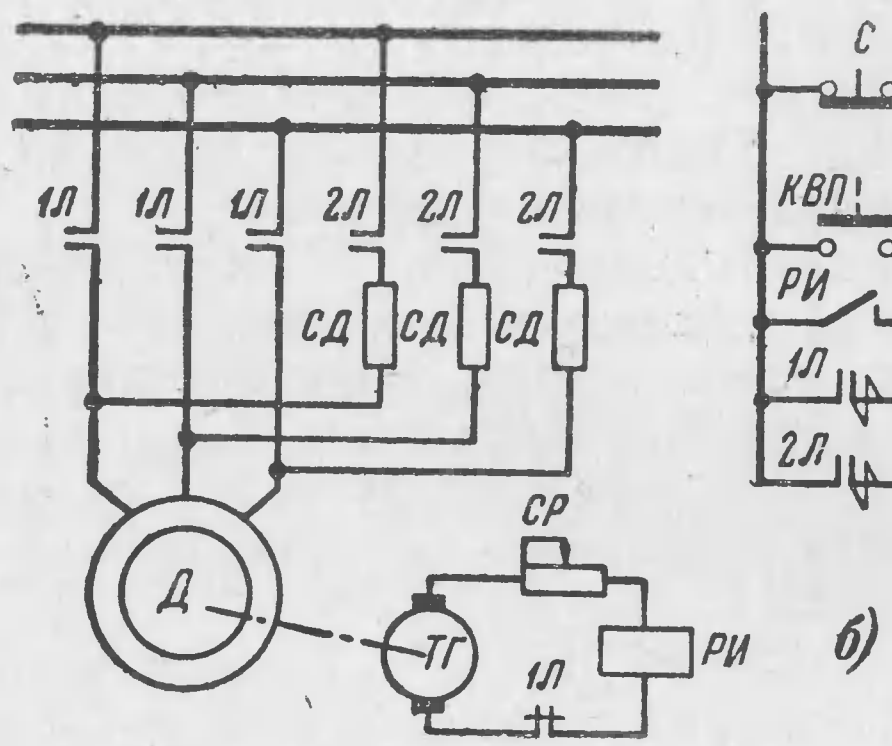
В настоящее время разрабатываются и внедряются в промышленность статические преобразователи частоты с использованием управляемых кремниевых выпрямителей. Эти преобразователи отличаются малыми размерами и весом, не имеют вращающихся частей, требуют минимального обслуживания.

ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ

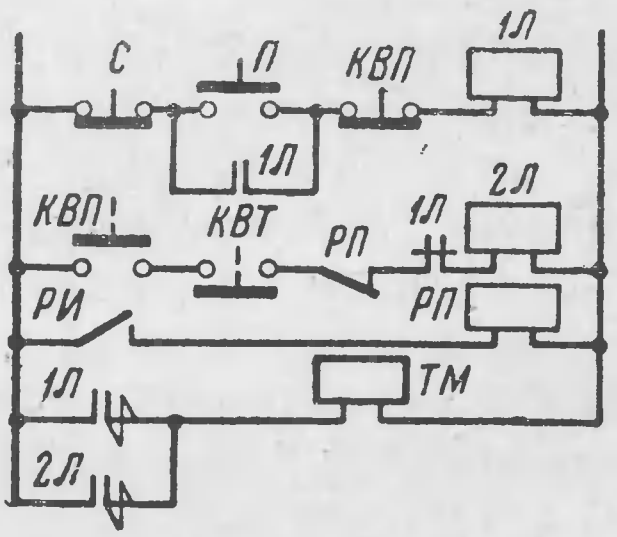
На практике получают распространение импульсные методы регулирования скорости. При таком регулировании напряжение на двигатель подается короткими импульсами, перемежающимися паузами. На рис. 27,*а* при-

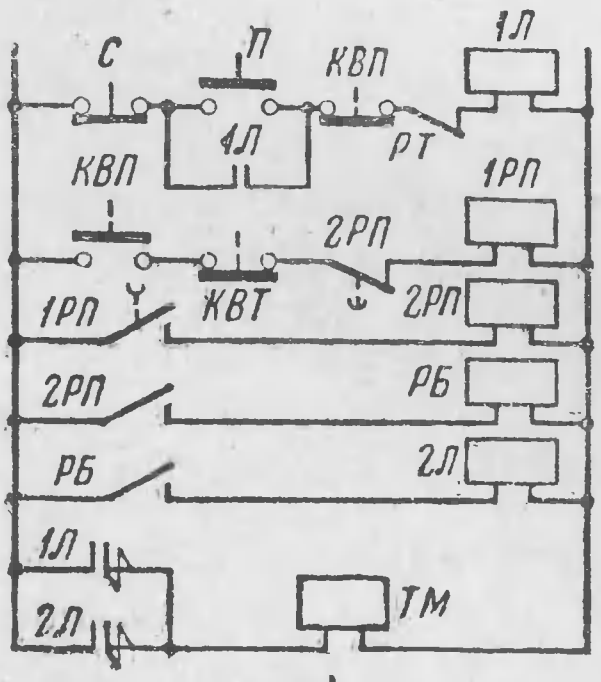


а)



б)





в)

Рис. 27. Импульсное регулирование скорости.

а — графики изменения напряжения *U* и скорости *n*; *б* — схема с тахогенератором; *в* — схема с пульс-парой.

ведены графики изменения напряжения на двигателе U и скорости его вращения n в функции времени. За время включения $t_в$ скорость электродвигателя не успевает значительно увеличиться, а за время паузы $t_о$ двигатель замедляется до остановки. Благодаря такому импульсному управлению можно получить достаточно низкую среднюю пониженную скорость $n_п$. С увеличением частоты импульсов колебания скорости уменьшаются. Изменяя соотношение $t_в$ и $t_о$, можно подобрать требуемую по условиям точной остановки величину скорости $n_п$.

На рис. 27,*б* показана одна из простых схем импульсного управления, разработанная ЭНИМС для металлорежущих станков. Двигатель *Д* длительно работает на скорости $n_р$; при этом включен контактор *1Л*. По команде конечного выключателя *КВП* начинается процесс замедления. Двигатель отключается и затормаживается тормозом *ТМ*. Размыкающий контакт *1Л* включает на зажимы тахогенератора *ТГ* быстродействующее слаботочное реле *РИ*. При скорости двигателя, близкой к нулю, реле *РИ* отпадает и разрывает цепь промежуточного реле *РП*. Включается контактор *2Л*, и двигатель начинает увеличивать свою скорость. Когда напряжение на тахогенераторе возрастет, вновь включится реле *РИ*, контактор *2Л* отключится и двигатель начнет затормаживаться. Импульсное включение и отключение двигателя, дающие среднюю пониженную скорость, будут продолжаться до тех пор, пока не сработает выключатель точной остановки *КВТ*, отключающий контактор *2Л*. Накладывается тормоз, и механизм останавливается в заданном положении.

Сопротивления *СД* в цепи статора служат для снижения пусковых токов и повышения плавности пуска двигателя.

На рис. 27,*в* приведен другой вариант описанной схемы, отличающийся отсутствием тахогенератора. Для импульсного управления служит пульс-пара, собранная на двух быстродействующих реле *1РП* и *2РП*.

Крупным недостатком релейно-контакторных схем импульсного управления является большое число включений аппаратуры. В последние годы начали разрабатываться бесконтактные схемы импульсного регулирования с использованием управляемых полупроводниковых выпрямителей.

НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И СПОСОБЫ ТОЧНОЙ ОСТАНОВКИ

а) Схема с управляемыми полупроводниковыми выпрямителями

В настоящее время начинается широкое применение полупроводниковых управляемых вентилей в схемах электропривода как постоянного, так и переменного тока.

Промышленностью выпускаются кремниевые управляемые вентили-тиристоры серий ВКДУ, ВКУ и УПВК на токи до 100—200 *а*. В отличие от неуправляемых диодов тиристоры имеют, помимо анода и катода, третий, управляющий электрод. Изменяя знак потенциала на этом электроде, можно «запирать» или «открывать» вентиль, т. е. управлять протеканием через него тока. Изменяя момент открывания вентиля, меняют среднее значение выпрямленного напряжения.

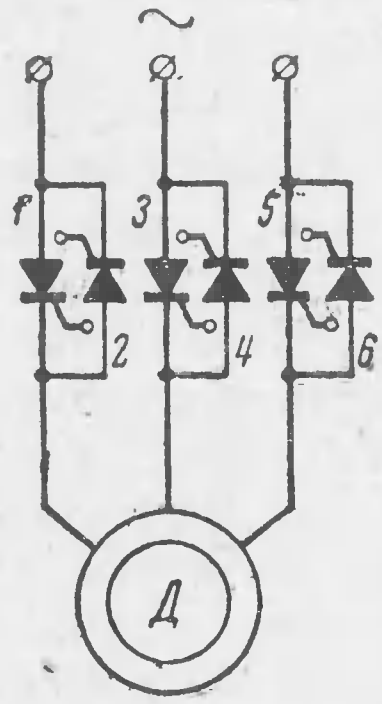


Рис. 28. Включение управляемых полупроводниковых вентилей в статор асинхронного двигателя для пуска и точной остановки.

Тиристоры, включенные в цепь статора, используются для управления двигателями переменного тока вместо силовых контакторов. Путем изменения момента открывания вентиля можно осуществлять схемы наложения постоянного тока на переменный в обмотке статора, несимметричного включения и т. п.

Одна из перспективных схем бесконтактного управления асинхронным электродвигателем для осуществления пуска и точной остановки приведена на рис. 28. В каждую линию питающей сети встречно-параллельно включены два управляемых полупроводниковых вентиля. Когда все вентили открыты, обмотка статора двигателя питается нормальным трехфазным током. Механизм работает на высокой скорости. Для перевода двигателя в режим динамического торможения достаточно прекратить протекание тока через все вентили, кроме двух (например закрыть тиристоры *2*, *3*, *5*, *6* и открыть *1*, *4*).

Для получения пониженной скорости вращения двигателя одна группа вентилей *1*, *3*, *5* открывается полно-

стью, а вторая группа *2*, *4*, *6* — частично. При этом двигатель получает питание током, содержащим постоянную составляющую, и работает на пониженной скорости (см. стр. 39). Легко осуществить схемы наложения постоянного тока на переменный по рис. 19.

Для отключения двигателя от сети на управляющие электроды всех шести вентилей подаются запирающие сигналы. Подобная схема применяется для пуска, реверса, торможения и точной остановки барабана летучих ножниц на одном из зарубежных прокатных станов.

б) Двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором

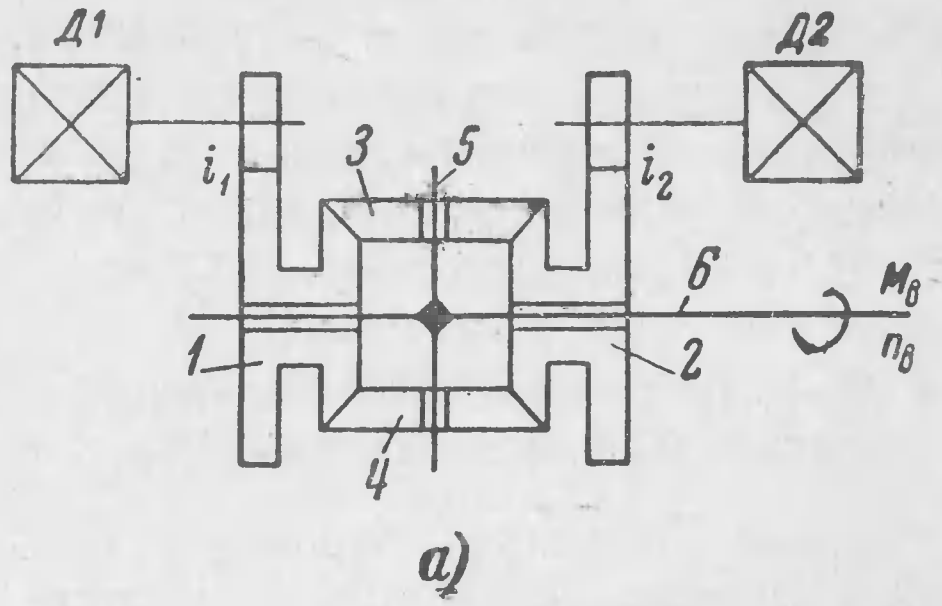
Для получения абсолютно точной остановки механизма у фиксирующего заданное положение механического упора может быть применен двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором (рис. 29,*а*). Электродвигатели *Д1* и *Д2* через зубчатые передачи i_1 и i_2 приводят во вращение ведущие конические шестерни *1* и *2* механического дифференциала. Шестерни-сателлиты *3* и *4* вращаются вокруг своих осей и, кроме того, вместе с валом *5* совершают вращение в вертикальной плоскости, перпендикулярной рисунку. При этом приводится во вращение выходной вал *6*. Оба двигателя работают одновременно. Когда двигатели работают согласно и шестерни *1* и *2* вращаются в одну и ту же сторону, скорость вращения выходного вала равна:

$$n_{в1} = \frac{1}{2}(n_1 + n_2),$$

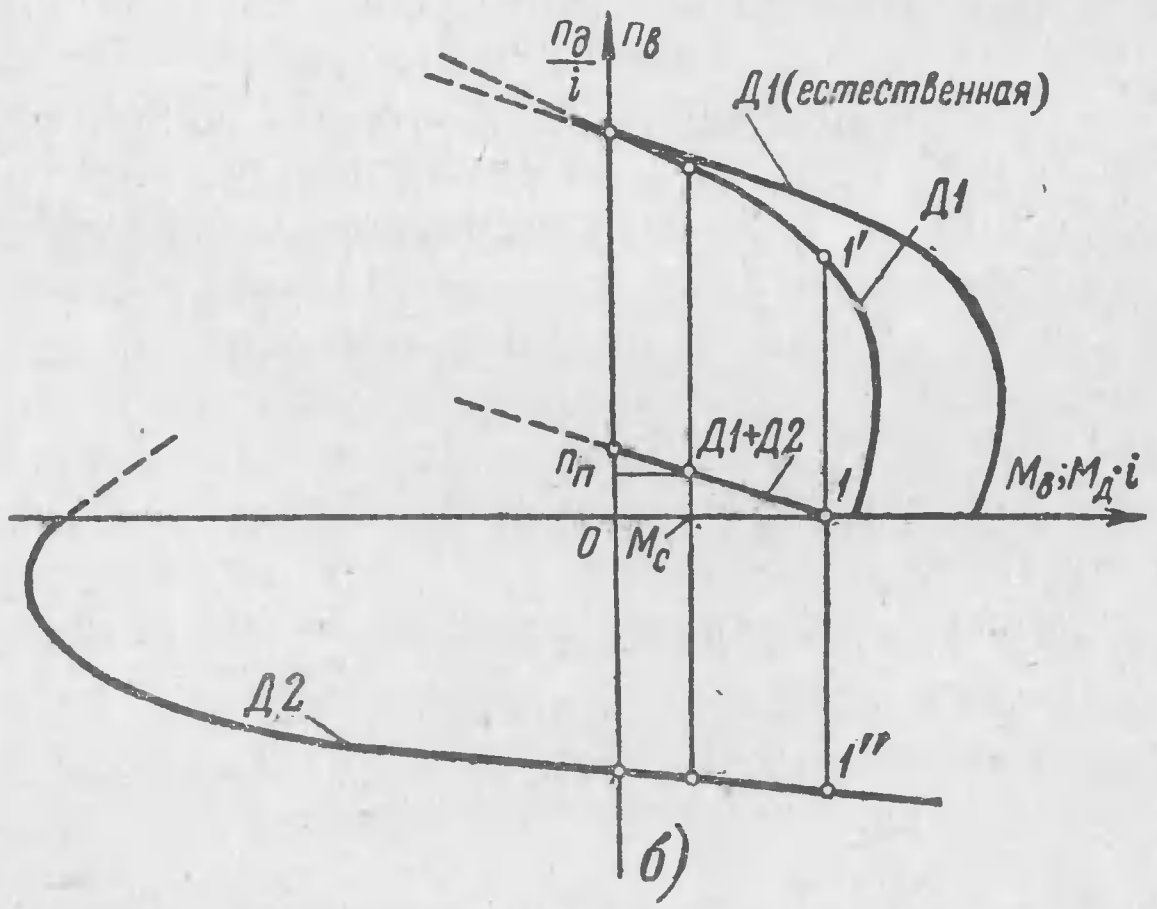
где n_1 и n_2 — скорости вращения ведущих шестерен дифференциала *1* и *2*. Механизм при этом имеет высокую рабочую скорость.

При подходе к заданному положению один из двигателей (с большим передаточным числом между валом двигателя и дифференциалом) реверсируется. Скорость вращения выходного вала *6* становится равной $n_{в2} = \frac{1}{2}(n_1 - n_2)$. (Считаем, что $i_1 < i_2$.) Если передаточные числа i_1 и i_2 близки друг к другу, можно получить очень низкую скорость механизма. В момент подхода к упору выходной вал *6* останавливается, а оба двигателя про-

должают вращаться со скоростями, немного отличающимися от первоначальных. На рис. 29,*б* приведены механические характеристики двигателей *Д1* и *Д2* при встречном включении и результирующая характеристика



а)



б)

Рис. 29. Двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором.

а — кинематическая схема; *б* — механические характеристики.

привода при работе на низкой скорости *Д1+Д2*. Скорости и моменты двигателей приведены к валам шестерен *1* и *2*. В момент остановки у упора рабочими точками характеристик являются *1′*, *1″* и *1*.

Для ограничения момента на выходном валу в цепь статора двигателя *Д1* (с меньшим передаточным чис-

лом) включаются добавочные сопротивления (выбор сопротивлений см. [Л. 3]). На рис. 29,*б* приведены две характеристики двигателя *Д1* — естественная и искусственная с включенными сопротивлениями. Работа на упор механизма с небольшим собственным моментом инерции получается практически безударной.

Передаточные числа от валов двигателей к дифференциалу равны:

$$i_1 = \frac{n_{01}}{n_{\text{в.макс}} + n_{\text{в.мин}}};$$

$$i_2 = \frac{n_{02}}{n_{\text{в.макс}} - n_{\text{в.мин}}},$$

где n_{01} и n_{02} — скорости холостого хода двигателей *Д1* и *Д2*;

$n_{\text{в.макс}}$ и $n_{\text{в.мин}}$ — скорости вращения выходного вала *6* при согласном и встречном включении двигателей на холостом ходу.

Двухдвигательные электроприводы с дифференциальным редуктором находят применение, в частности, на ряде металлургических механизмов, работающих на упор.

в) Использование двигателей специальной конструкции

В зарубежной практике известно применение двигателей специальной конструкции для получения точной остановки механизмов. Фирмой Броун-Бовери были предложены так называемые сдвоенные стоп-двигатели (рис. 30). На станине главного двигателя *1* устанавливается вспомогательный двигатель малой мощности *2*. Оба двигателя имеют роторы конической формы. Для получения высокой скорости на сеть включается главный двигатель *1*. Благодаря взаимодействию магнитных полей статора и ротора ротор двигателя *1* смещается в осевом направлении и тормозной диск *3* отходит от барабана *4*. При этом ротор двигателя *1* освобождается и развивает полную скорость. При отключении двигателя *1* от сети тормозной диск *3* прижимается к барабану *4* и двигатель затормаживается.

Для перехода на низкую скорость включается двигатель *2*. Пружина *5* сжимается, и тормозной диск *6* освобождается. Движение от ротора двигателя *2* к меха-

низму передается через зубчатые зацепления и вал главного двигателя *1*. При отключении двигателя *2* от сети он затормаживается встроенным тормозом. Такие стоп-двигатели нашли применение для привода станков и грузоподъемных механизмов.

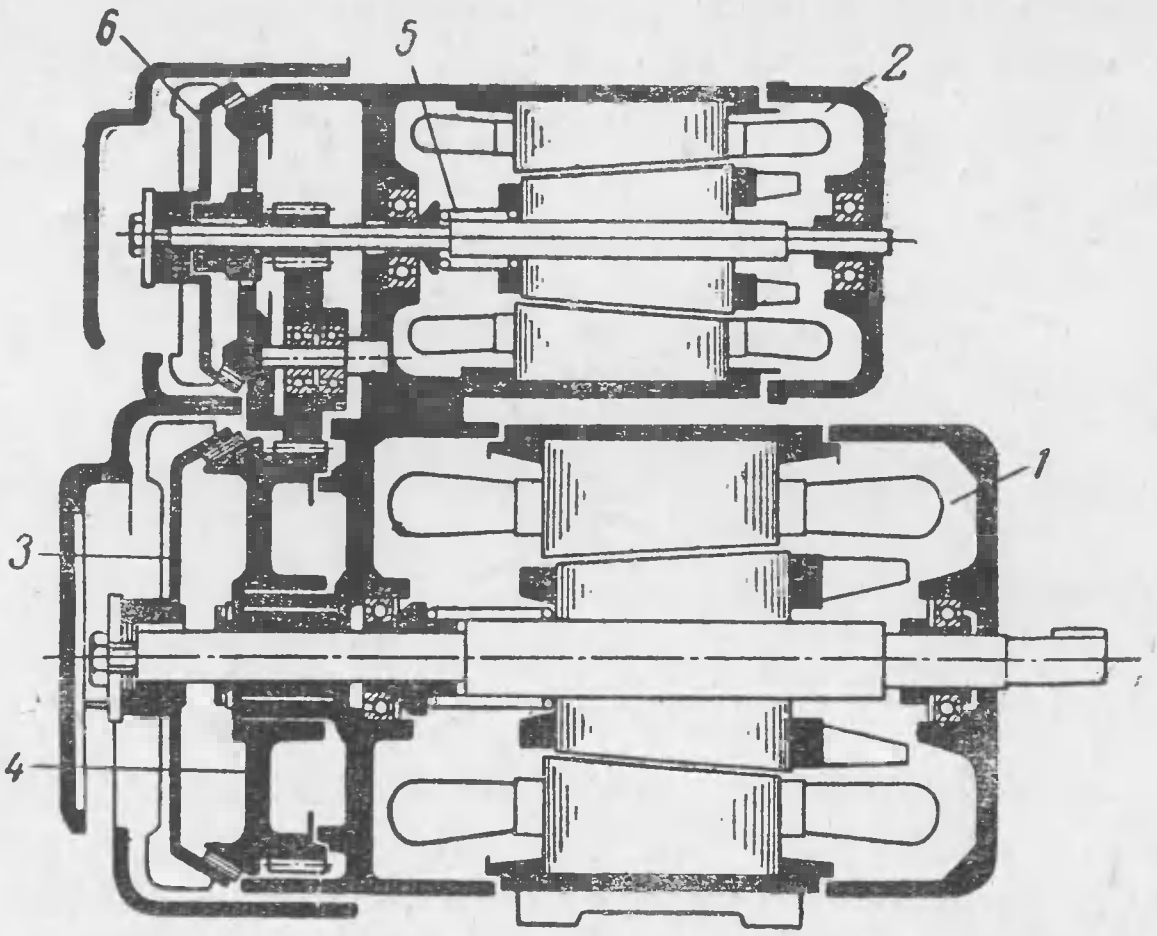


Рис. 30. Разрез сдвоенного стоп-двигателя.

г) Применение механических фиксаторов

В ряде случаев, когда электрические способы не дают требуемой точности остановки механизма в заданных положениях, используются механические фиксаторы.

На рис. 31 показан принцип действия механического фиксатора, применяемого на некоторых станках для остановки шпинделя в заданном положении. Диск с вырезом *1* механически соединен со шпинделем станка. На станке установлен штифт *2*, который может перемещаться электромагнитом *3*. Со штифтом связан конечный выключатель *4*. Во время нормальной работы электромагнит *3* включен, контакты конечного выключателя *4* замкнуты. После окончания технологической операции электродвигатель переводится на пониженную скорость, электромагнит *3* отключается, и под действием пружины *5* штифт прижимается к диску *1*. В положении точной остановки штифт входит в вырез диска, контакты

выключателя 4 размыкаются, и двигатель отключается.

Для поступательно движущихся механизмов также иногда применяются механические фиксаторы, причем, несмотря на различные конструкции, принцип действия их аналогичен описанному. Такие фиксаторы используются, в частности, для точного совпадения монорельса,

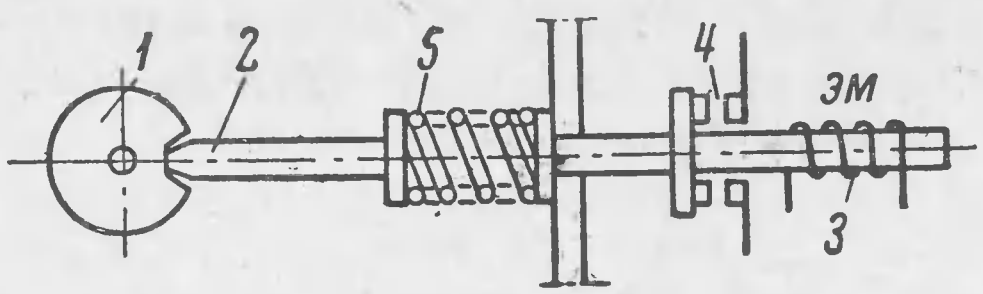


Рис. 31. Механический фиксатор.

установленного на кран-балке, со стационарным монорельсом, когда нужно обеспечить перемещение тельфера с кран-балки на стационарные пути.

ВЫВОДЫ

1. Для получения низких устойчивых скоростей вращения, используемых кратковременно перед точной остановкой механизма, нет необходимости применять сложные, дорогостоящие системы электропривода (Г-Д, ЭМУ-Д, дроссели насыщения с автоматическим регулированием, «управляемый полупроводниковый выпрямитель-двигатель» и т. д.). Имеется большое число простых схем получения «ползучей» скорости двигателей переменного тока, основанных на методе наложения тормозного момента на двигательный. Хорошие результаты дают также импульсное регулирование скорости и ряд специальных схем.

2. Наиболее простыми являются схемы наложения постоянного тока на переменный в обмотке статора с использованием полупроводниковых выпрямителей, дающие низкую скорость до 2—3% синхронной.

3. Весьма низкие скорости (менее 1%) можно получить путем подачи постоянного тока в одну из обмоток двухскоростного асинхронного двигателя.

4. Для остановки ротора в строго фиксированном положении можно использовать схему электромагнитной фиксации постоянным током, который подается в статор

и ротор после предварительного выхода на пониженную скорость.

5. При использовании схем совмещения двигательного и тормозного режимов в электродвигателе необходимо иметь в виду, что пусковой момент уменьшается, а ток в несколько раз превышает номинальный.

6. Большое разнообразие схем позволяет на практике легко выбрать одну из них в зависимости от предъявляемых требований, а также от наличия электрооборудования и аппаратуры.

6. КОНДЕНСАТОРНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Часто требуемая точность остановки механизма может быть обеспечена без предварительного перехода на пониженную скорость путем торможения с рабочей скорости до полной остановки. Так, нет необходимости усложнять схему для получения «ползучей» скорости, если основная рабочая скорость механизма невелика, момент инерции мал, а статический момент нагрузки значителен и мало меняется. В таких случаях для остановки двигателя обычно используется один из следующих видов торможения: динамическое торможение постоянным током, торможение противовключением, механический тормоз.

В последние годы получает распространение конденсаторное торможение асинхронных двигателей малой мощности, которое с точки зрения быстроты остановки, сокращения тормозного пути и повышения точности часто дает лучшие результаты, чем перечисленные выше способы торможения, обладающие рядом недостатков.

Динамическое торможение путем подачи постоянного тока в статор отключенного электродвигателя дает небольшой момент в зоне высоких скоростей, поэтому путь и время торможения получаются значительными. Торможение противовключением (включение обмотки статора для реверсирования двигателя с последующим отключением от сети перед остановкой) не обеспечивает точной остановки из-за разбросов в срабатывании реле скорости; оно неприменимо при большом числе включений

двигателя, так как вызывает его повышенный нагрев. Применение механического тормоза при торможении с высокой скорости вызывает повышенный износ и часто не дает требуемой точности.

На рис. 32,*а* приведена схема включения двигателя при конденсаторном торможении. Параллельно двигателю включаются конденсаторы, обычно соединенные по схеме треугольника. При отключении двигателя от сети токи разряда конденсаторов создают магнитное поле, вращающееся с низкой скоростью. Машина переходит в режим генераторного торможения, скорость снижается до величины, соответствующей скорости вращения возбужденного поля. Во время разряда конденсаторов появляется большой тормозной момент, который с уменьшением скорости падает. В начале торможения происходит быстрое поглощение запасенной ротором кинетической энергии при малой величине тормозного пути. Величина пика тормозного тока при самых больших значениях емкости не превышает пускового тока.

На рис. 32,*б* построены тормозные характеристики двигателей единой серии малой мощности для разных значений емкости [Л. 5]. Номинальной емкостью $C_н$ считается такая емкость, которая обеспечивает полную компенсацию тока намагничивания двигателя при номинальной нагрузке.

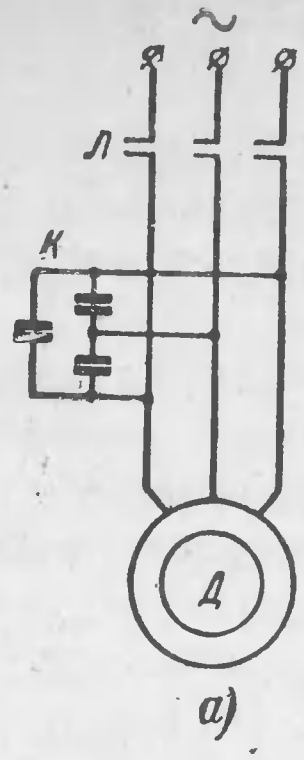
Как видно из кривых рис. 32,*б*, с ростом емкости конденсаторов тормозной момент увеличивается и торможение длится до более низкой скорости. Исследования показали, что оптимальная величина емкости лежит в пределах 4—6 $C_н$ [Л. 5].

Для сети частотой 50 *гц* величина номинальной емкости конденсаторов при соединении треугольником подсчитывается по формуле

$$C_н = 3\,185 \frac{I_{0н}}{U_н},\ мкф,$$

где $I_{0н}$ — ток намагничивания двигателя (на фазу);
$U_н$ — номинальное линейное напряжение.

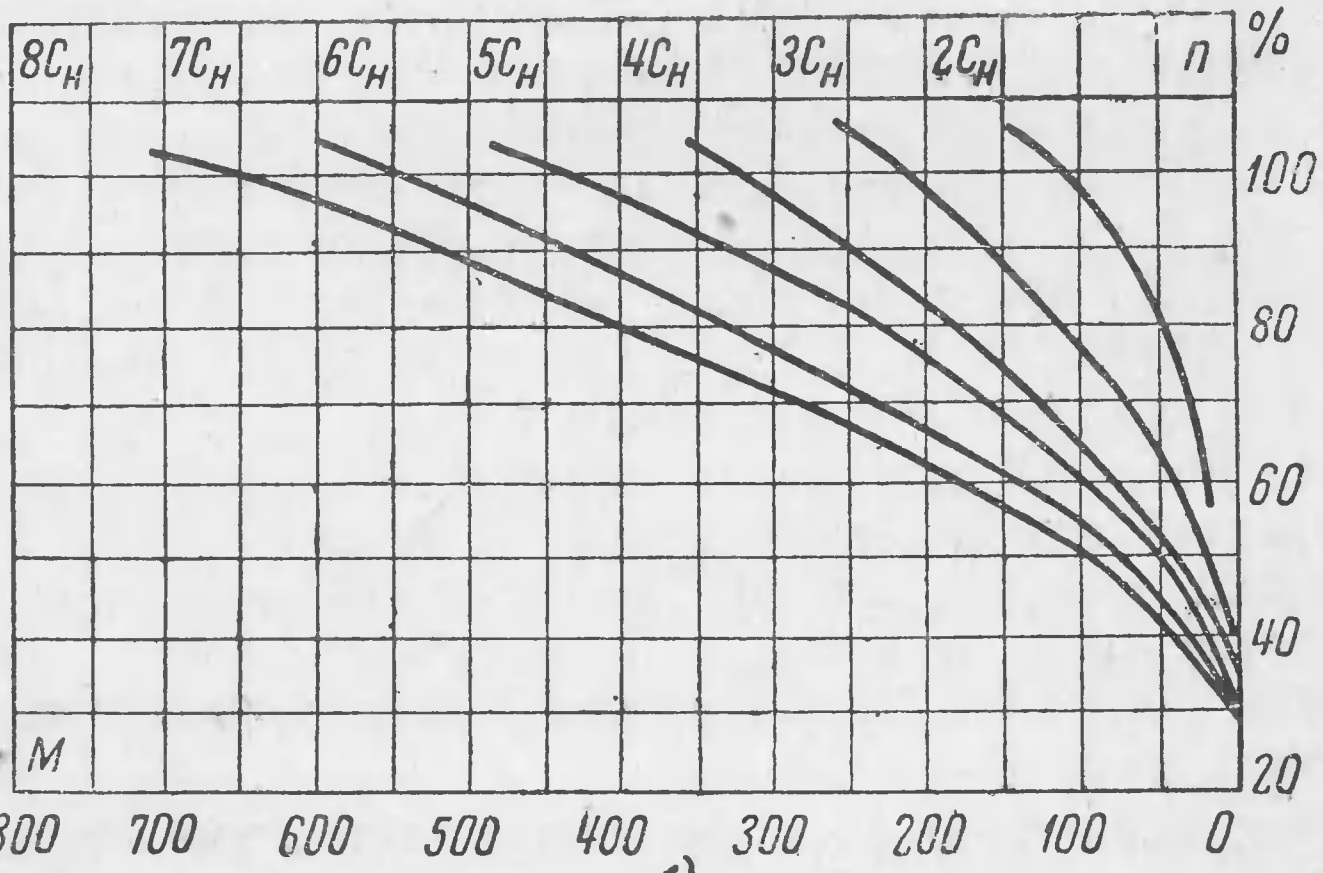
Конденсаторное торможение прекращается при скоростях примерно 30—40% номинальной, когда скорость ротора становится равной скорости вращения поля статора от возникающих в статоре свободных токов. При



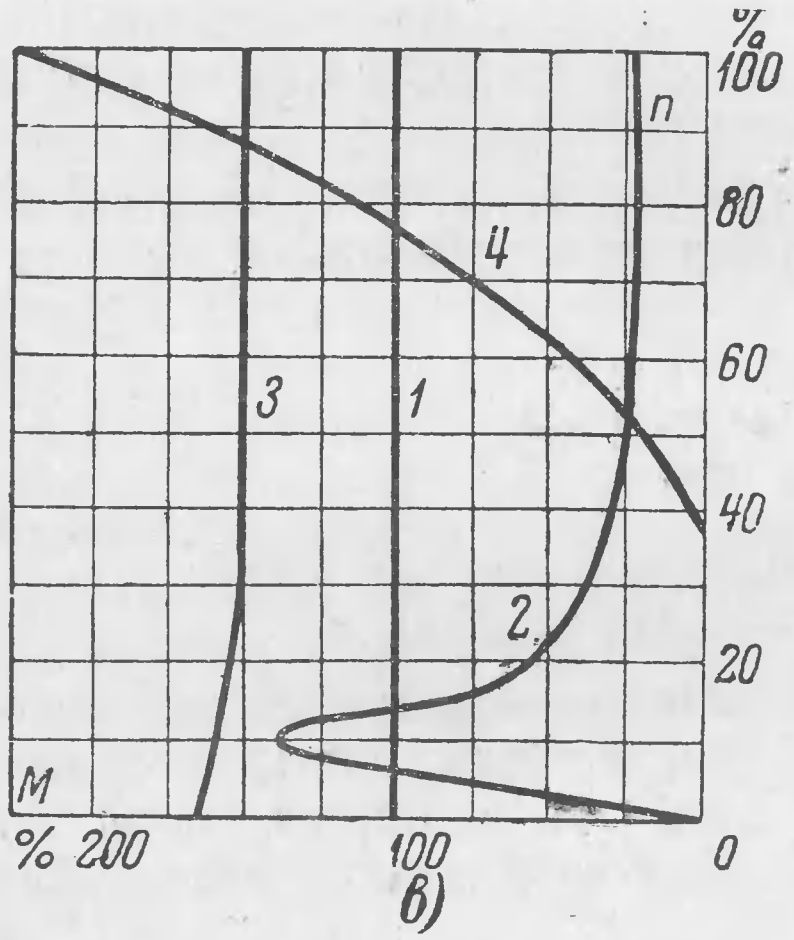
а)

Рис. 32. Конденсаторное торможение асинхронных электродвигателей.

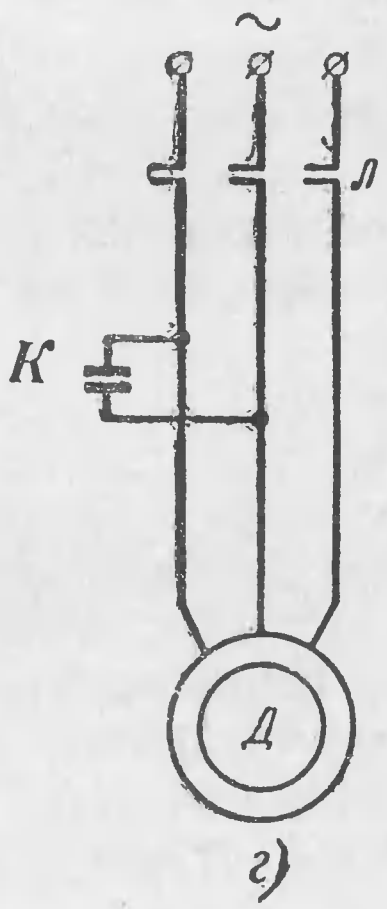
а — включение конденсаторов по схеме треугольника; *б* — тормозные характеристики; *в* — сравнение характеристик различных способов электрического торможения; *1* — механический тормоз; *2* — динамическое торможение; *3* — торможение противовключением; *4* — конденсаторное торможение. *г* — однофазное включение конденсаторов.



б)



в)



г)

этом в процессе торможения поглощается примерно $^3/_4$ кинетической энергии, запасной приводом. Для полной остановки двигателя по схеме рис. 32,*а* необходимо наличие на валу момента сопротивления.

Описанная простейшая схема выгодно отличается отсутствием переключающих аппаратов, простотой обслуживания, надежностью и экономичностью. Используются обычно конденсаторы типов МБГЧ, МБГП, КБГ и силовые трехфазные конденсаторы типов КМВ и КМ. Конденсаторное торможение по простейшей схеме рис. 32,*а* с глухо подключенными по схеме треугольника конденсаторами целесообразно применять для быстрой и точной остановки электроприводов, на валу которых действует момент нагрузки не менее 25% номинального момента двигателя.

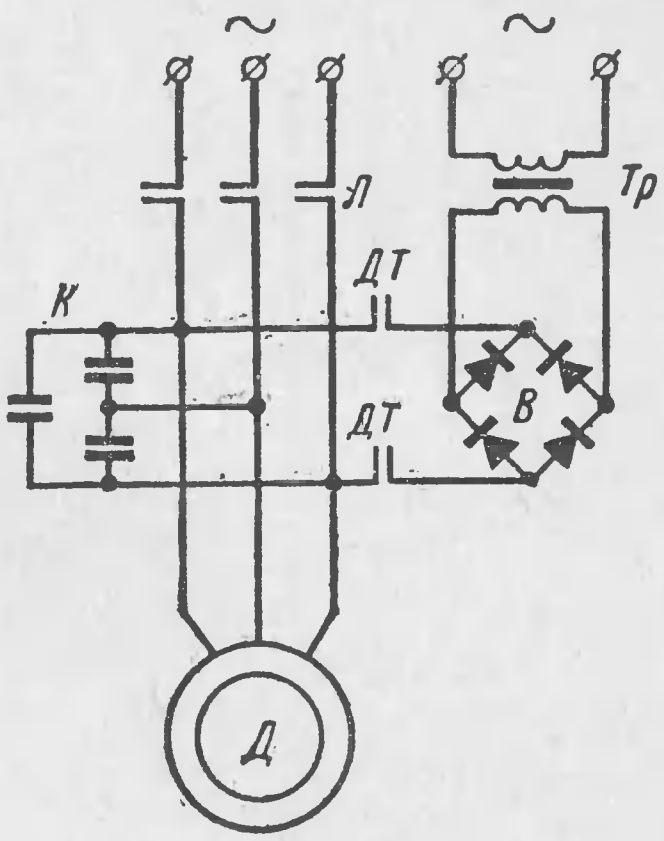


Рис. 33. Совмещение конденсаторного и динамического торможения.

Для осуществления конденсаторного торможения может быть применена и упрощенная схема: однофазное включение конденсаторов (рис. 32,*г*). Для получения такого же тормозного эффекта, как при трехфазном включении емкости, необходимо, чтобы емкость конденсатора в однофазной схеме была в 2,1 раза больше емкости в каждой фазе по рис. 32,*а*. При этом, однако, емкость в однофазной схеме составляет лишь 70% суммарной емкости конденсаторов при их трехфазном включении.

На рис. 32,*в* приведены для сравнения характеристики четырех различных способов торможения.

Для устранения основного недостатка конденсаторного торможения — прекращения действия до полной остановки электродвигателя — используются два несложных метода. Первый из них заключается в совмещении конденсаторного и динамического торможения. На рис. 33 дана схема включения силовых цепей двигателя при таком способе. Когда заканчивается конден-

саторное торможение, включается контактор динамического торможения *ДТ* и в две фазы статора подается постоянный ток от выпрямителя *В*. При сниженной скорости момент динамического торможения значителен (см. рис. 32,*в*), что и обеспечивает быстрое окончательное затормаживание двигателя.

Эффективность такого двухступенчатого торможения видна из следующего примера [Л. 5]. При динамическом торможении двигателя АЛ 41-4 (1,7 *квт*, 1 440 *об/мин*) с внешним маховым моментом на валу, составляющим 22% махового момента ротора, время торможения равно 0,6 *сек*, а тормозной путь 11,5 оборотов вала. При совмещении конденсаторного и динамического торможения время и путь торможения сокращаются до 0,16 *сек* и 1,6 оборота вала (емкость конденсаторов была принята равной 3,9 $C_н$).

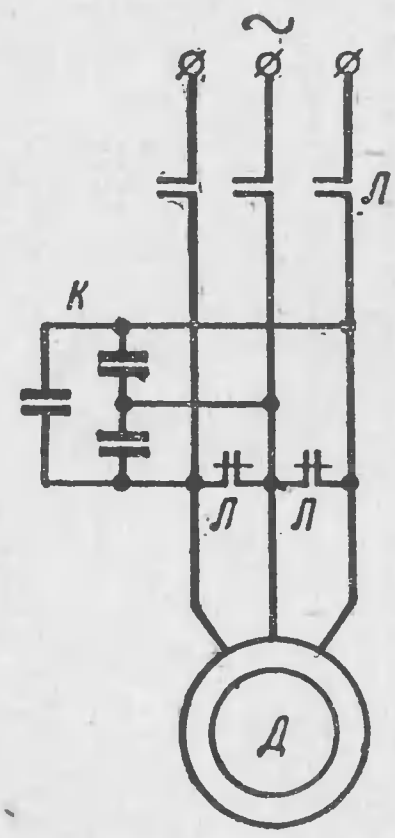


Рис. 34. Схема сочетания конденсаторного торможения с коротким замыканием статора.

Для двигателей мощностью менее 5 *квт* Л. П. Петровым предложен метод сочетания конденсаторного торможения с торможением коротким замыканием статора (рис. 34). Способ эффективен при условии, что момент инерции механизма не превышает 30% момента инерции ротора. При этом способе после предварительного снижения скорости в режиме конденсаторного торможения производится короткое замыкание на зажимах статора, вызывающее кратковременное новое возрастание тормозного момента. Происходит быстрое снижение скорости до полной остановки. Для короткого замыкания статора двигателей мощностью до 1,0 *квт* используются обычно блок-контакты линейного контактора.

В такой схеме время торможения двигателя АО 41-6 (1 *квт*, 930 *об/мин*) с конденсаторами 3×32 *мкф* (3,8 $C_н$) при работе вхолостую с небольшими маховыми массами на валу (14% махового момента ротора) составляет всего 0,05 *сек*. Вал двигателя успевает повернуться на 0,4 оборота [Л. 5]. Для двигателей мощностью выше 1,0 *квт* короткое замыкание осуществляют отдельным маломощ-

ным контактором с некоторой выдержкой времени после отключения линейного контактора, чтобы скорость двигателя успела снизиться под действием конденсаторного торможения.

Нагрев двигателя при двухступенчатом конденсаторном торможении в 2 раза меньше, чем при динамическом торможении. Поэтому этот способ выгодно применять для точной остановки приводов, работающих с большим числом включений.

Для двигателей средней и большой мощности конденсаторное торможение оказывается малоэффективным, так как запас энергии магнитного поля растет медленнее, чем момент инерции ротора.

Если для привода механизма используется асинхронный двигатель с фазным ротором, то «ползучую» скорость в конце конденсаторного торможения можно получить путем переключения конденсаторов в цепь ротора, включив их последовательно с дросселями. Схема рис. 35,*а* позволяет получить низкую устойчивую скорость менее 2% синхронной скорости. Нормально электродвигатель пускается при включенных контакторах *Л*, *Л1* и *КТ*. После срабатывания контакторов ускорения *1У*, *2У* и *3У* двигатель выходит на естественную характеристику *1* (рис. 35,*б*). При моменте сопротивления M_c привод работает на высокой скорости $n_р$. Конденсаторы *С* включены в цепь статора. В первый период торможения отключается контактор *Л* и двигатель переходит из точки *А* в режим конденсаторного торможения по характеристике *2* в точку *Б*. В конце этого этапа отключаются конденсаторы *КТ* и *Л1* и включаются контакторы *Л* и *П*. В каждую фазу ротора включаются последовательно соединенные емкость *С* и индуктивность *L*. Эти колебательные цепочки *С—L* нормально представляют высокое сопротивление; ток и момент двигателя малы. При заранее выбранной низкой скорости частота тока в роторе возрастает до резонансной, при которой сопротивление цепей *С—L* резко падает. В роторе появляется большой ток, создающий значительный момент. Характеристика двигателя в этом режиме построена на рис. 35,*б* (кривая *3*). Двигатель из точки *В* переходит в точку *Г* и далее работает на жесткой характеристике низкой скорости в точке *Д*. Расчет величин индуктивности и емкости приведен в [Л. 7].

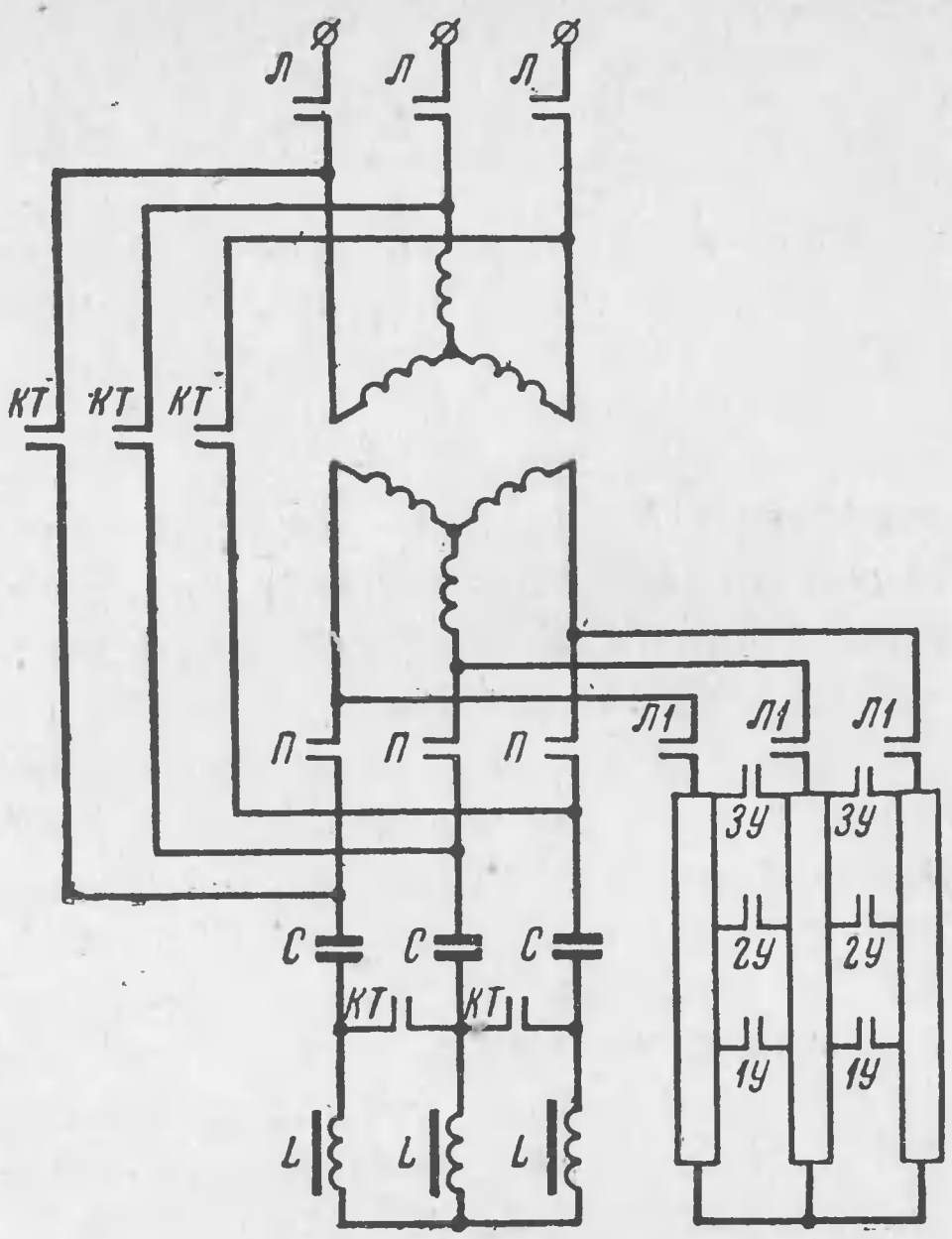


Рис. 35. Переключение конденсаторов в цепь ротора для получения «ползучей скорости».

а — схема; *б* — механические характеристики.

Конденсаторное торможение используется на металлорежущих станках, на некоторых вспомогательных металлургических механизмах и т. п.

Пример 4. Выбор конденсаторов

Рассчитать величину емкости и выбрать конденсаторы для торможения электродвигателя АО-52-6, 4,5 *квт*, 380 *в*, 950 *об/мин*. Рассмотреть симметричное и несимметричное включение емкости.

1. Номинальная емкость

$$C_н = 3\,185\frac{I_{0н}}{U_н} = 3\,185\frac{4,5}{380} = 37,7 \text{ мкф}.$$

Ток холостого хода $I_{0н} = 4,5$ *а*.

2. Требуемая фазная емкость конденсаторов при трехфазном включении по схеме треугольника (рис. 32,*а*).

Примем пятикратное значение емкости

$$C_з = 5C_н = 5 \cdot 37,7 = 188 \text{ мкф}.$$

Итак, требуются конденсаторы емкостью 3×188 *мкф*. Выбираем трехфазный конденсатор типа КМ-0,38, 380 *в*, 3×220 *мкф*.

3. При однофазном включении емкости (рис. 32,*г*) для получения равной эффективности торможения требуется емкость

$$C_1 = 2,1C_з = 2,1 \cdot 188 = 396 \text{ мкф}.$$

ВЫВОДЫ

1) Конденсаторное торможение является надежным, эффективным и простым средством торможения асинхронных двигателей малой мощности.

2) При наличии достаточного статического момента на валу двигателя, обеспечивающего остановку после окончания действия конденсаторного торможения, электропривод быстро и с высокой точностью останавливается.

3) Для увеличения быстроты и точности остановки следует использовать двухступенчатое торможение путем сочетания конденсаторного и динамического торможения. Для получения быстрой и точной остановки двигателей мощностью менее 5 *квт* целесообразно использовать короткое замыкание статора после снижения скорости под действием конденсаторного торможения.

4) Для уменьшения суммарной емкости конденсаторов при сохранении тормозного эффекта можно использовать однофазное включение емкости.

5) Быстрота затормаживания ведет к повышению производительности механизмов.

7. ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В тех случаях, когда по условиям технологии требуется плавное регулирование скорости в большом диапазоне, применяется электропривод постоянного тока. Двигатель постоянного тока (обычно независимого возбуждения) получает питание от источника регулируемого напряжения — магнитного или электромашинного усилителя, генератора постоянного тока, управляемого полупроводникового или ртутного выпрямителя и т. п.

Подобные системы электропривода обеспечивают регулирование скорости в большом диапазоне (до 1 : 100 и более), и осуществление точной остановки, если она требуется, не представляет труда. Если же механизм приводится двигателем постоянного тока, который питается от цеховой сети постоянного тока, то для получения устойчивой пониженной скорости (обычно до 15—20% номинальной) используются схемы шунтирования якоря сопротивлениями.

а) Схема шунтирования якоря электродвигателя параллельного возбуждения (рис. 36)

С помощью сопротивлений — добавочного $r_д$ и шунтирующего $r_ш$ — напряжение на якоре снижается и соответственно падает скорость вращения электродвигателя. Если на естественной характеристике *1* (рис. 36,*б*) скорость холостого хода равна n_0, то при шунтировании якоря (характеристика *3*) скорость холостого хода понижается до величины $n_{0ш}$. Величину этой скорости можно определить по формуле

$$n_{0ш} = n_0 \frac{r_ш}{r_ш + r_д}.$$

Например, если принять $r_ш = 0{,}25\, R^*_н$, а $r_д = 0{,}5\, R_н$, то скорость холостого хода снижается втрое:

$$n_{0ш} = n_0 \frac{0{,}25 R_н}{0{,}25 R_н + 0{,}5 R_н} = \frac{n_0}{3}.$$

---

* Номинальное сопротивление $R_н = \frac{U_н}{I_н}$.

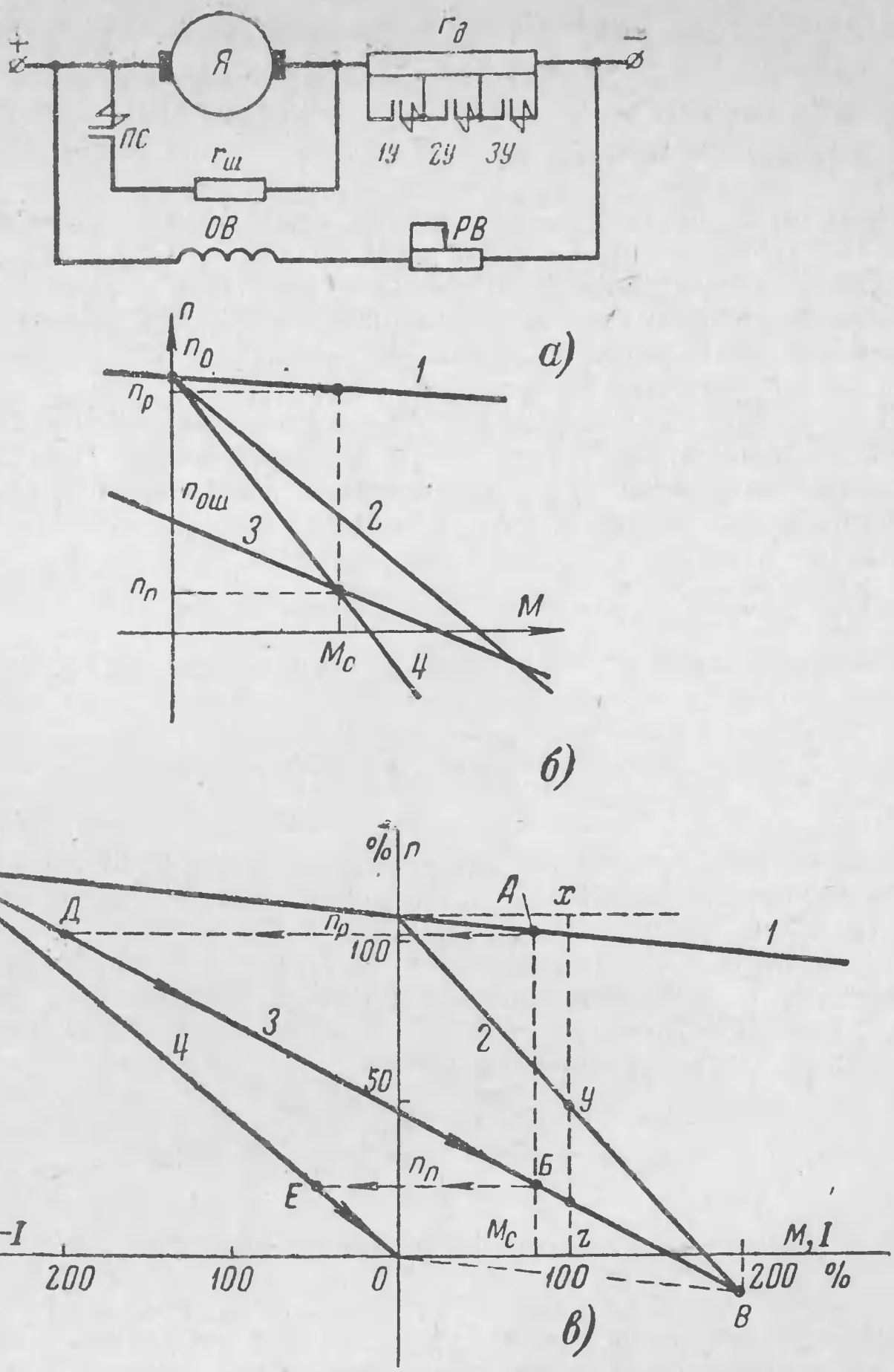


Рис. 36. Шунтирование якоря двигателя параллельного возбуждения.

а — схема; *б* — характеристики; *в* — построение характеристики пониженной скорости.

При моменте нагрузки M_c получим при шунтировании якоря пониженную скорость $n_п$ (рис. 36,*б*), которая является значительно более устойчивой, чем при работе на реостатной характеристике *4*. Характеристика *2* получается при включенном $r_д$ и отключенном $r_ш$.

Расчет шунтирующего и добавочного сопротивлений для получения пониженной скорости легко выполняется графоаналитическим методом. Рассмотрим этот расчет на конкретном примере.

Пример. 5. Механизм приводится двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением типа ДП-41, 16 *квт*, 220 *в*, 85 *а*, 690 *об/мин*; сопротивление якоря $r_я = 0{,}195$ *ом*. Рассчитать величину добавочного и шунтирующего сопротивлений для получения пониженной скорости перед остановкой $n_п = 0{,}2\, n_н$ (20% номинальной) при моменте нагрузки на валу $M_с = 0{,}8\, M_н$.

Для расчета сопротивлений строятся характеристики — естественная *1* и реостатная *2* (рис. 36,*в*). Характеристика *2* соответствует полностью введенным пусковым сопротивлениям. Эта характеристика строится при выборе пусковой диаграммы. Примем, что при имитировании якоря в качестве добавочного сопротивления используются все пусковые ступени. Проведем вертикальную прямую через точку $M = M_н$ (100%).

Величина добавочного сопротивления в омах найдется по формуле

$$r_д = \frac{U_н}{I_н} \cdot \frac{xy}{xz} = \frac{220}{85} \cdot \frac{34}{60} = 1{,}47 \text{ ом}.$$

Первую точку искомой механической характеристики шунтирования якоря — *Б* находим, отложив при $M_с = 0{,}8\, M_н$ значение $n_п = 0{,}2\, n_н$. Вторая точка *В* находится как пересечение характеристики *2* с прямой *ОВ*, параллельной естественной характеристике *1*. Через точки *Б* и *В* проводится искомая характеристика *3* до пересечения с естественной в точке *Г*. Величина шунтирующего сопротивления $r_ш$ определяется по формуле

$$r_ш = \frac{U_н}{I_{я(Г)}} = \frac{220}{2{,}7 \cdot 85} = 0{,}96 \text{ ом},$$

где $I_{я(Г)}$ — ток якоря, соответствующий точке *Г*.

Если ток якоря в точке *Г* превысит допустимый (для двигателей постоянного тока серий ПН и П кратковременно допустима при полном потоке токовая перегрузка в 2,5 раза, а для двигателей ДП со стабилизирующей обмоткой — в 3 раза), то необходимо либо увеличить $r_д$, либо увеличить $r_ш$.

Для точной остановки двигателя по команде датчика предварительного замедления контактором *ПС* включается сопротивление $r_ш$; контакторы ускорения *1У*, *2У*, *3У* отключаются, вводя добавочное сопротивление $r_д$. Двигатель из точки *А* переходит, как показано стрелкой, в точку *Д* (рис. 36,*в*) и под влиянием отрицательного электромагнитного момента и статического момента сопротивления на валу замедляется до пониженной скорости $n_п$ (точка *Б*).

По команде датчика точной остановки двигатель отключается от сети и останавливается под действием динамического торможения (из точки *Б* переходит на характеристику динамического торможения в точку *Е* и далее замедляется до полной остановки).

б) Схема шунтирования якоря электродвигателя последовательного возбуждения

Для получения пониженной скорости вращения двигателя последовательного возбуждения следует использовать схему шунтирования сопротивлением только якоря (без последовательной обмотки возбуждения, рис. 37,*а*). Благодаря тому, что даже при отсутствии на-

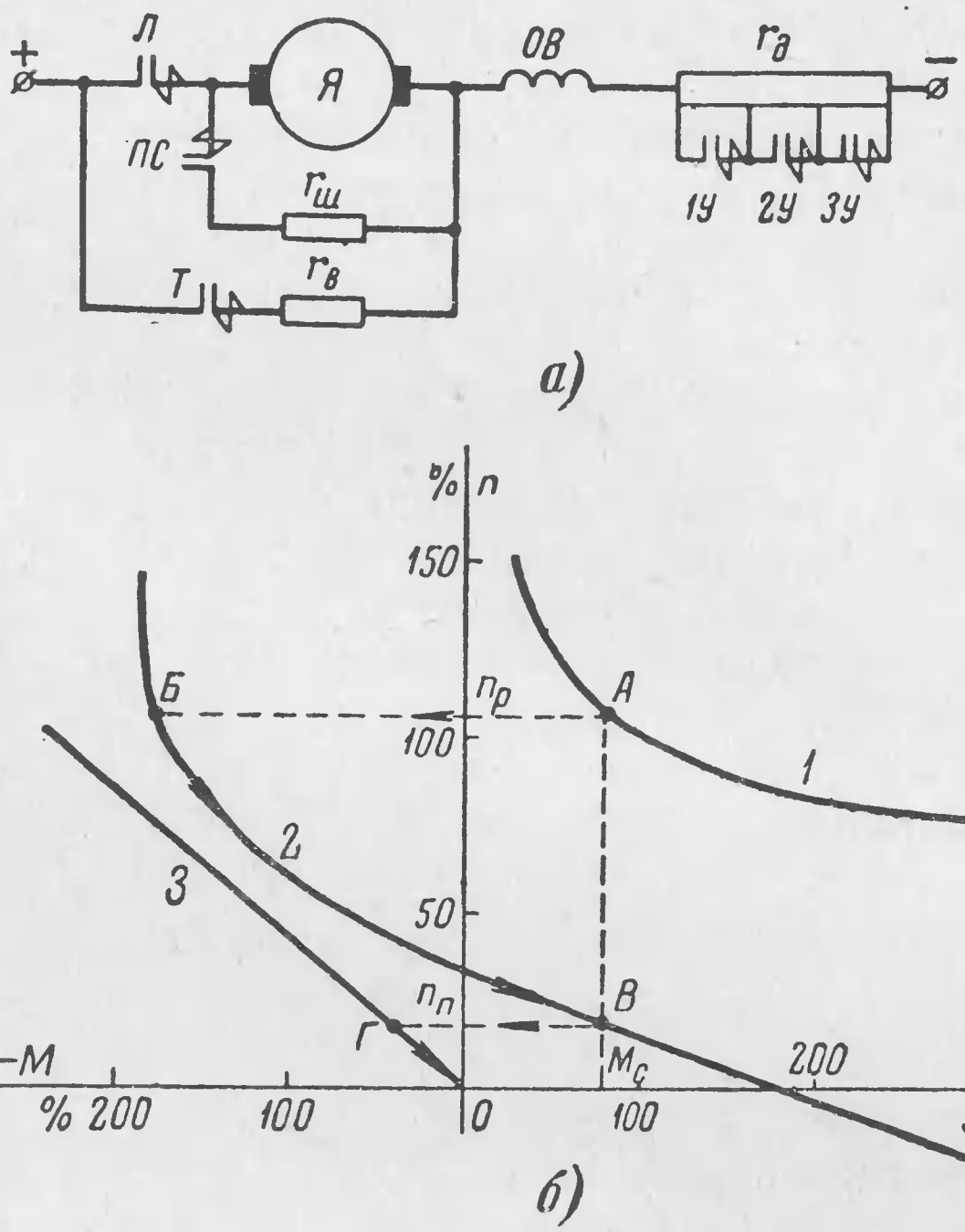


Рис. 37. Шунтирование якоря двигателя последовательного возбуждения.
а — схема; *б* — характеристики.

грузки на двигателе обмотка возбуждения обтекается током через шунтирующее сопротивление $r_ш$, двигатель развивает низкую скорость даже при малых статических моментах.

Механические характеристики привода показаны на рис. 37,*б*. Характеристика *1* естественная; характеристика низкой скорости *2* построена для значений добавочного и шунтирующего сопротивлений: $r_д = 0{,}5\,R_п$ и $r_ш =$

$=0{,}25\,R_н$. Чем меньше величина шунтирующего сопротивления, тем ниже скорость вращения электродвигателя. Обычно используются пониженные скорости до 15—20% номинальной.

Рассмотрим процесс замедления электродвигателя для получения точной остановки. По команде путевого выключателя предварительного замедления включается контактор *ПС* — вводится в работу шунтирующее сопротивление $r_ш$. Одновременно отключаются контакторы ускорения *1У*, *2У*, *3У*.

Двигатель, работавший на естественной характеристике в точке *А* (рабочая скорость $n_р$), переходит в режим генераторного торможения и замедляется до пониженной скорости $n_п$ (стрелками показан переход из точки *А* в точку *Б* и далее в точку *В*). После кратковременной работы электродвигателя на пониженной скорости срабатывает выключатель точной остановки. Отключается линейный контактор *Л* и включается контактор *Т*, дающий независимое питание обмотке возбуждения. Двигатель получает полный поток, переходит в режим динамического торможения по характеристике *3* (из точки *В* в точку *Г*) и останавливается. В случае необходимости используется также механический тормоз.

Добавочное сопротивление $r_в$ выбирается таким, чтобы через обмотку возбуждения *ОВ* протекал номинальный ток:

$$r_в = \frac{U_н}{I_н} - (r_д + r_{ов}),$$

где $U_н$ — номинальное напряжение;
$I_н$ — номинальный ток двигателя;
$r_{ов}$ — сопротивление обмотки возбуждения.
Выбор сопротивлений по нагреву — см. [Л. 3].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

Механические характеристики

Механической характеристикой называется кривая зависимости скорости двигателя от момента на его валу (рис. 38).

Под естественной механической характеристикой двигателя (рис. 38, кривая *1*) понимается характеристика двигателя при номинальном напряжении и частоте тока, без добавочных сопротивлений в цепях статора и ротора (якоря) и при полном возбуждении (для двигателей постоянного тока). Характеристики двигателя, получаемые при изменении электрических параметров, называются искусственными (характеристика *2* при включении добавочных сопротивлений в цепь ротора).

Механическая характеристика двигателя проходит в *I*, *II* и *IV* квадрантах, а при изменении полярности включения или чередования фаз — в *III*, *IV* и *II* квадрантах.

Механические характеристики могут быть жесткими или мягкими. Характеристика является жесткой, если с ростом момента скорость меняется мало. Если же при небольших изменениях момента скорость сильно изменяется, то характеристика называется мягкой (характеристика *1* — жесткая, характеристика *2* — мягкая).

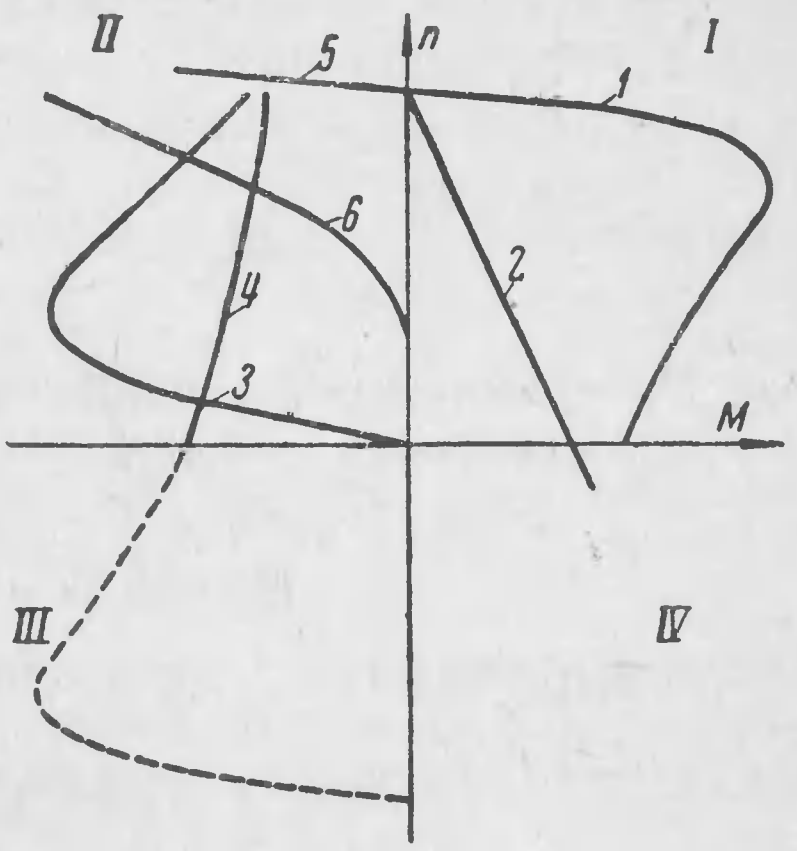


Рис. 38. Механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном и тормозных режимах.

1 — естественная; *2* — реостатная; *3* — характеристика динамического торможения; *4* — характеристика торможения противовключением; *5* — естественная характеристика в зоне рекуперативного торможения; *6* — характеристика конденсаторного торможения.

Статическим моментом M_c называется момент нагрузки на валу двигателя.

Динамическим моментом $M_{дин}$ называют результирующий момент на валу двигателя, т. е. алгебраическую сумму момента двигателя, момента нагрузки, тормоза.

Для приведения момента нагрузки к валу двигателя необходимо разделить момент на передаточное число между валом двигателя и валом приложения момента.

Система единиц

В расчетах используется международная система единиц СИ, введенная с 1963 г. ГОСТ 9867-61. Масса тела по новой системе единиц измеряется в килограммах (*кг*) и численно равна весу тела (*кг*) в ранее применявшейся технической системе единиц МКГСС. Единицей силы в новой системе является 1 *н* (ньютон), равный $^1/_{9,81}$ *кГ* в системе МКГСС. Соответственно единицей момента вращения является 1 $н \cdot м = {}^1/_{9,81}$ $кГ \cdot м$.

Номинальный момент двигателя

$$M_н = \frac{9\,550 P_н}{n_н},\ н \cdot м,$$

где $P_н$ — номинальная мощность, *квт*, а $n_н$ — номинальная скорость, *об/мин*.

Моменты инерции

Момент инерции J вращающихся частей привода равен:

$$J = mr^2,\ кг \cdot м^2,$$

где m — масса тела, *кг*;

r — радиус инерции, *м*.

Для расчетов в новой международной системе единиц необходимо перевести маховой момент ротора (якоря) двигателя $GD^2_д$, указанный в каталоге по системе МКГСС, в момент инерции $J_д$:

$$J_д = \frac{GD^2_д}{4}.$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции массы m, поступательно движущейся со скоростью v, равен:

$$J' = \frac{91{,}2mv^2}{n^2},\ кг \cdot м^2,$$

где m — *кг*, v — *м/сек*;

n — скорость вращения двигателя, *об/мин*.

Момент инерции вращающегося тела для приведения к валу двигателя необходимо разделить на квадрат передаточного числа

$$J' = \frac{J}{i^2}.$$

Формулы для расчета пути торможения

Механические характеристики асинхронного двигателя в режимах динамического торможения, торможения противовключением, генераторного (рекуперативного) и конденсаторного торможения приведены на рис. 38.

а) Относительно постоянный тормозной момент (торможение противовключением, наложение механического тормоза).

Время торможения

$$t_т = \frac{J'(n_1 - n_2)}{9{,}55 \cdot M_{дин}}, \ сек,$$

где J' — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции всех движущихся частей, $кгм^2$;

n_1 и n_2 — начальная и конечная скорости вращения, $об/мин$;

$M_{дин}$ — приведенный к валу двигателя результирующий тормозной момент, $н \cdot м$.

Угловой путь торможения в оборотах вала двигателя

$$\varphi_т = \frac{n_1 + n_2}{120} t_т.$$

б) Тормозной момент изменяется по прямолинейному закону (рекуперативное торможение, конденсаторное торможение). Путь торможения от скорости n_1 до n_2 (в оборотах двигателя)

$$\varphi_т = \frac{J'}{573} C \left[(CM_{дин1} + n_1) 2{,}3 \lg \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}} - (n_2 - n_1) \right],$$

где

$$C = \frac{n_2 - n_1}{M_{дин1} - M_{дин2}},$$

$M_{дин1}$ и $M_{дин2}$ — динамические моменты при n_1 и n_1.

Сводная таблица основных расчетных формул в системах единиц СИ и МГКСС

№ п/п.	Наименование величины	Формула в международной системе единиц СИ	Формула в технической системе единиц МКГСС	Примечание
1	Угловой путь торможения (в оборотах вала двигателя)	$\varphi_т \cong \frac{\delta i}{180} + \frac{n_{нач} t_а}{60} + \frac{J' n_{нач}^2}{1\,140 M_{дин}}$	$\varphi_т \cong \frac{\delta i}{180} + \frac{n_{нач} t_а}{60} + \frac{GD^2{}' n_{нач}^2}{45\,000 M_{дин}}$	Для случая неизменного в процессе торможения суммарного тормозного момента
2	Максимальная неточность остановки (в оборотах вала двигателя)	$\Delta\varphi_{т.макс} \cong \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{ср} t_{а.ср}}{60} \times \left(\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta t}{t_{а.ср}}\right) + \frac{J'_{ср} n_{ср}^2}{1\,140 M_{дин.ср}} \times \left(2\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta J'}{J'_{ср}} + \frac{\Delta M}{M_{дин.ср}}\right)$	$\Delta\varphi_{т.макс} \cong \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{ср} t_{а.ср}}{60} \times \left(\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta t}{t_{а.ср}}\right) + \frac{GD^2{}' n_{ср}^2}{45\,000 M_{дин.ср}} \times \left(2\frac{\Delta n}{n_{ср}} + \frac{\Delta GD^2{}'}{GD^2{}'_{ср}} + \frac{\Delta M}{M_{дин.ср}}\right)$	
3	Приближенная формула для расчета максимальной неточности остановки	$\Delta\varphi_{т.макс} \cong \cong \pm \frac{J'_{макс} n_{нач}^2}{2\,280 (M_т + M_{с.макс})}$	$\Delta\varphi_{т.макс} \cong \cong \pm \frac{GD^2{}'_{макс} n_{нач}^2}{9 \cdot 10^4 (M_т + M_{с.макс})}$	
4	Номинальный момент двигателя	$M_н = \frac{9\,550 P_н}{n_н}$	$M_н = \frac{975 P_н}{n_н}$	

5	Суммарный момент инерции или маховой момент движущихся частей привода	$J' = \frac{1{,}25GD^2_д}{4} + \frac{91{,}2mv^2}{n^2}$	$GD^{2\prime} = 1{,}25GD^2_д + \frac{365Gv^2}{n^2}$	
6	Время и путь торможения электропривода от скорости n_1 до n_2 при неизменном в процессе замедления тормозном моменте	$t_т = \frac{J'(n_1 - n_2)}{9{,}55(M_т + M_с)}$ $\varphi_т = \frac{J'(n_1^2 - n_2^2)}{1\,140(M_т + M_с)}$	$t_т = \frac{GD^{2\prime}(n_1 - n_2)}{375(M_т + M_с)}$ $\varphi_т = \frac{GD^{2\prime}(n_1^2 - n_2^2)}{4\,500(M_т + M_с)}$	
7	Путь торможения электропривода от скорости n_1 до n_2 при изменении тормозного момента по прямолинейному закону	$\varphi_т \cong \frac{J'}{573} C \left[(CM_{дин_1} + n_1) \times 2{,}3 \lg \frac{M_{дин_1}}{M_{дин_2}} - (n_2 - n_1)\right]$	$\varphi_т \cong \frac{GD^{2\prime}}{22\,500} C \left[(CM_{дин_1} + n_1) \times 2{,}3 \lg \frac{M_{дин_1}}{M_{дин_2}} - (n_2 - n_1)\right]$	$C = \frac{n_2 - n_1}{M_{дин_1} - M_{дин_2}}$
8	Время и путь динамического торможения до полной остановки	$t_т \cong \frac{J'n\left(1 - 0{,}15\frac{M_с}{M_н}\right)}{9{,}55(0{,}6M_н + M_с)}$ $\varphi_т \cong \frac{nt_т}{90}\left(1 - 0{,}11\frac{M_с}{M_н}\right)$	$t_т \cong \frac{GD^{2\prime}n\left(1 - 0{,}15\frac{M_с}{M_н}\right)}{375(0{,}6M_н + M_с)}$ $\varphi_т \cong \frac{nt_т}{90}\left(1 - 0{,}11\frac{M_с}{M_н}\right)$	Для электродвигателей серии МТК

Примечания: 1. Размерности величин, входящих в формулы расчетов в системе СИ: δ — *град*, n — *об/мин*, t — *сек*. M — *н·м*, J — *кг·м²*, P — *квт*, m — *кг*, v — *м/сек*, GD^2 — *кг·м²*, φ — обороты вала.

2. Размерности величин, входящих в формулы расчетов в технической системе единиц, те же, за исключением: M — *кГ·м*, G — *кГ*.

Технические данные

Тип	Исполнение по защищенности	Наличие моментного отключения	Количество контактов		Рабочий ход подвижной системы	Полный ход
			З	Р		
ВК-311А	Водозащищенное	Есть	1	1	12°	27°
ВК-211	Пыле-брызгонепроницаемое	Есть	1	1	12°	27°
ВК-401 ВК-410 ВК-411	Пыле-брызгонепроницаемое	Нет	— 1 1	1 — 1	До 8,5 *мм*	10 *мм*
ВК-511к	Пыле-брызгонепроницаемое	Нет	1	1	6,5 (7) *мм*****	7,5 (8) *мм*
ВК-512к	Пыле-брызгонепроницаемое	Нет	Три контакта в любой комбинации		6,5 (7) *мм*****	7,5 (8) *мм*
ВКМ-411 — ВК-1111	Пыле-брызгонепроницаемое	Есть	1	1	2,2—3 *мм*	3—6 *мм*
КУ-501	Брызгозащищенное	Нет	Два контакта в любой комбинации		7,5°—размык. 20°—замыкан.	30°
ВК700/2	Взрывозащищенное	Нет	2	2	24°	44°
ВВ-5	Взрывозащищенное	Нет	2	2	30°	45°
ВВ-6П	Взрывозащищенное	Нет	1	1	—	—

* Предельный кратковременный ток до 30 *а*.
** Предельный отключаемый ток до 12 *а*.
*** При скорости упора не менее 100 *мм/мин*.
**** Перед скобками указаны данные для исполнения с роликом, в скобках—

конечных выключателей

Требуемое усилие нажатия, *кГ*	Длительно допустимый ток, *а*	Допустимый ток включения, *а*	Отключаемый ток в цепи 380 *а*	Максимальная скорость переключающего упора, *м/мин*	Механическая износоустойчивость (число включений)	Количество исполнений рычага	Размеры, *мм*	Вес, *кг*
10	6	24*	6**	60	2 000 000	4	79×68,5×162	1,8
8	6	24*	6**	60	1 000 000	4	90×61,5×150	1,3
5	6	20	6***	—	—	1	70×47×119	0,7
1,3 (1,2)	6	20	6***	—	5 000 000	3	66×45×120 (66×45×88)	0,585 (0,52)
1,3 (1,2)	6	20	6***	—	5 000 000	3	66×45×148 (66×45×119)	0,807 (0,74)
1,2—3	5	15	2	—	2 000 000	до 6	От 66×37×38 до 45×57×111	От 0,075 до 0,5
4	10	50	10	150	—	1	200×190×190	4,0
—	5	—	5	—	—	1	145×230×200	3,2
—	15	—	5	—	—	1	290×190×137	—
—	20	—	5	—	1 000 000	1	240×96×132	9,9

с нажимным толкателем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Регулируемые командоаппараты серии КА-4000

Тип	Количество цепей	Исполнение по защищенности	Передаточное число встроенного редуктора	Размеры, *мм*	Вес, *кг*
КА4324	2	Пыленепроницаемое	Без редуктора	310×266×285	16
КА4658-1 КА4658-3 КА4658-5 КА4658-6	5	Водозащищенное	1 : 1 1 : 15 1 : 30 1 : 5	296×308×446	28
КА4024	2	Защищенное	Без редуктора	253×328×271	17
КА4044	4	Защищенное	Без редуктора	355×328×271	21
КА4054	6	Защищенное	Без редуктора	457×328×271	24
КА4028-1 КА4028-2	2	Защищенное	1 : 30 1 : 5	269×328×271	25,5
КА4048-1 КА4048-2	4	Защищенное	1 : 30 1 : 5	371×328×271	29,5
КА4058-1 КА4058-2	6	Защищенное	1 : 30 1 : 5	473×328×271	34
КА4148-3 КА4148-4	8	Защищенное	1 : 16,65 1 : 1; 1 : 20; 1 : 36	545×485×270	60
КА4168-3 КА4168-4	16	Защищенное	1 : 16,65 1 : 1; 1 : 20; 1 : 36	831×485×270	97
КА4188-3 КА4188-4	24	Защищенное	1 : 16,65 1 : 1; 1 : 20; 1 : 36	1 035×485×270	102
КА4828-1 КА4828-3	2	Взрывозащищенное	1 : 1 1 : 15	270×310×437	—
КА4848-1 КА4848-3	4	Взрывозащищенное	1 : 1 1 : 15	270×310×537	—

Примечание. Для всех командоаппаратов, кроме КА4828 и КА4848, длительно допустимый и отключаемый в цепи 380 *в* токи равны 15 *а*, кратковременный ток—до 75 *а*. Для командоаппаратов КА4828 и КА4848 токи соответственно равны 10 *а* и 50 *а*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандлер А. С., Электрооборудование производственных механизмов, Госэнергоиздат, 1958.

2. Соколов М. М., Электрооборудование общепромышленных механизмов, Госэнергоиздат, 1959.

3. Вешеневский С. Н., Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей, Госэнергоиздат, 1954.

4. Сандлер А. С., Точный останов электроприводов трехфазного тока, «Вестник электропромышленности», 1940, № 10.

5. Петров Л. П., Конденсаторное торможение асинхронных короткозамкнутых двигателей, Сб. «Регулируемые электроприводы и бесконтактная автоматика в машиностроении», изд. Московского Дома научно-технической пропаганды им. Дзержинского, 1962.

6. Гутников Э. Ю., Розе И. Г., Автоматический точный останов приводов с асинхронными электродвигателями методом наложения постоянного тока на переменный, ЦИТЭИН, сб. «Автоматизированный электропривод», Москва, 1960, № 1.

7. Сиротин А. А., Автоматическое управление электроприводами, Госэнергоиздат, 1959.

8. Мейстель А. М., Параил В. А. и др., Точная остановка станочных приводов с асинхронными электродвигателями, «Станки и инструмент», 1964, № 4.

9 Ключев В. И., Выбор электродвигателей для производственных механизмов, изд. 2-е (Библиотека электромонтера, вып. 127), «Энергия», 1964.

Цена 16 коп.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ЭНЕРГИЯ» БУДУТ ВЫПУЩЕНЫ В 1965 г.

Бранзбург Е. З., Сохранский С. Т., Хромченко Г. Е., Соединение и оконцевание кабелей до 10 *кв* с пластмассовой изоляцией

Епишин В. Ф., Резка проводов и тросов при монтаже ЛЭП

Живов М. С., Индустриальный монтаж осветительных установок

Зак С. М., Монтаж светильников с газоразрядными лампами

Иевлев В. И. и Карягин А. Г., Монтаж распределительных устройств на тепловых электростанциях

Масанов Н. Ф., Электропроводки в трубопроводах

Мандрыкин С. А., Ремонт электродвигателей на электростанциях

Мишустина Л. И., Воздушные автоматические установочные выключатели серии А3100

Найфельд М. Р., Защитные заземления в электрических установках

Устинов П. И., Ремонт стационарных свинцово-кислотных аккумуляторов

Хазан С. И., Ремонт турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением

Чернев К. К., Безопасные способы работы в электроустановках