

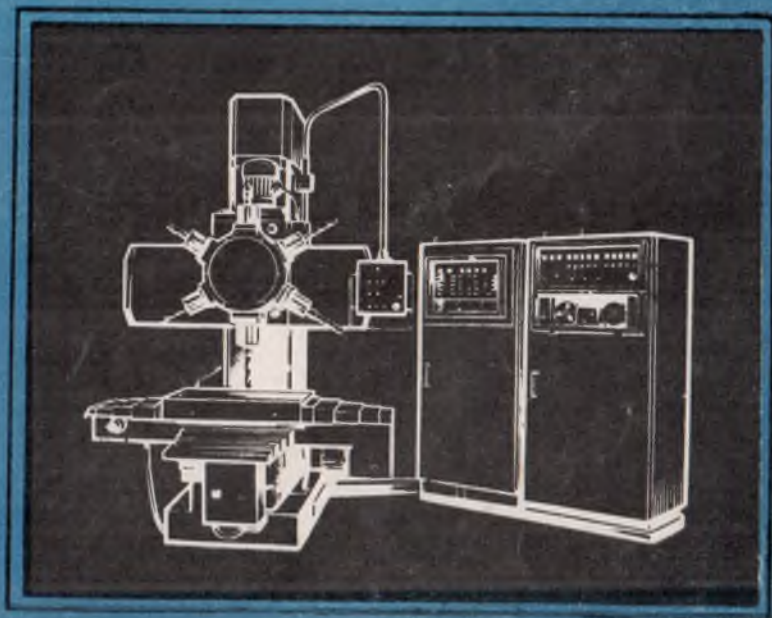
БИБЛИОТЕКА



СТАНОЧНИКА

Я. Б. Розман, Б. З. Брейтер

УСТРОЙСТВО, НАЛАДКА  
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ



БИБЛИОТЕКА



СТАНОЧНИКА

**Я. Б. Розман, Б. З. Брейтер**

**УСТРОЙСТВО, НАЛАДКА  
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ**



МОСКВА « МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1985

Редакционная коллегия:

лауреат Государственной премии проф. **С. И. Самойлов** (председатель),  
доц. **А. В. Коваленко**, инж. **Г. Н. Кокшаров**, канд. техн. наук **В. А. Куприянов**, проф. **В. В. Лоскутов**, инж. **Г. Р. Мозжилкин**, канд. техн. наук  
проф. **Ю. С. Шарин**

Рецензент инж. **П. П. Песков**  
Редактор инж. **Г. А. Багдасаров**

*Долгопрудненский авиационный техникум*

## **Электронная библиотека**



Заказчик: А.Ю.Козловский Исполнитель А.В.Каран



141702 Россия, Московская обл.,  
г. Долгопрудный, пл. Собина, 1

Phone: 8(495)4084593 8(495)4083109  
Email: [dat.ak@mail.ru](mailto:dat.ak@mail.ru)  
Site: [gosdat.ru](http://gosdat.ru)

**Розман Я. Б., Брейтер Б. З.**

Устройство, наладка и эксплуатация электроприводов металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1985. — 208 с., ил. — (Б-ка станочника).

75 к.

Описаны электродвигатели, датчики частоты вращения, полупроводниковые преобразователи, системы автоматического управления. Рассмотрены защита электроприводов, ремонт, способы повышения качества и надежности работы станочных приводов.

Для рабочих-станочников и наладчиков, эксплуатирующих станочное электрооборудование.

704040000-103  
38(01)-85

ББК 34.44  
6П4.6.08

© Издательство «Машиностроение», 1985 г.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Привод — это устройство, приводящее в движение станок, машину или отдельный механизм, который может быть составной частью станка или машины. Например, в станке имеются механизмы главного движения, подачи и вспомогательных перемещений. Привод состоит из двигателя, передаточного механизма, преобразователя и аппаратуры управления. Двигатели бывают электрическими, гидравлическими, пневматическими, внутреннего сгорания и т. д. Иногда в качестве двигателя применяют устройство, отдающее заранее накопленную механическую энергию (пружинный, инерционный и другие механизмы). Независимо от вида электродвигателя (переменного, постоянного токов и др.) электропривод различают по способу регулирования частоты вращения: нерегулируемый, ступенчато регулируемый, плавно регулируемый.

На рис. 1 представлены типовые схемы электроприводов с различными способами регулирования частоты вращения и угла поворота вала двигателя. На нем показаны нерегулируемые двигатели с рабочим механизмом (РМ) без изменения частоты вращения (рис. 1, а), с механическим одноступенчатым изменением частоты вращения с помощью редуктора, уменьшающего частоту вращения, или мультипликатора, увеличивающего ее (рис. 1, б), и с многоступенчатым изменением частоты вращения за счет коробок передач с механическим или электромагнитным переключением (рис. 1, в). Электрические ступенчатые регуляторы частоты вращения (переключение обмоток статора, резисторов и др.) также бывают одно- и многоступенчатыми (рис. 1, г). Приводы с плавным регулированием частоты вращения можно разделить на приводы без применения обратной связи по частоте или противо-ЭДС (рис. 1, д) и с применением цепи обратной связи по частоте (рис. 1, е). Новой системой привода является привод с обратными связями как по скорости (G), так и по пути (BG) (рис. 1, ж).

Внедрение новых материалов, высокопроизводительного режущего инструмента, расширение и обновление ряда технологических операций, предназначенных для увеличения производительности станка и повышения точности обработки, предъявляют новые, ужесточенные требования на различные механизмы

### 1. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Параметр	Привод	
	главный	подачи
Диапазон частоты вращения	До 1:1000	До 1:30000
Диапазон мощностей, кВт	2—300	0,05—11
Закон регулирования при изменении частоты вращения	Постоянство мощности и момента	Постоянство момента
Погрешность частоты вращения относительно установленной при, %:		
$n$	2	2
$0,1n$	5	10
$0,01n$	15	15
$0,001n$	30	25
$0,0001n$	—	35

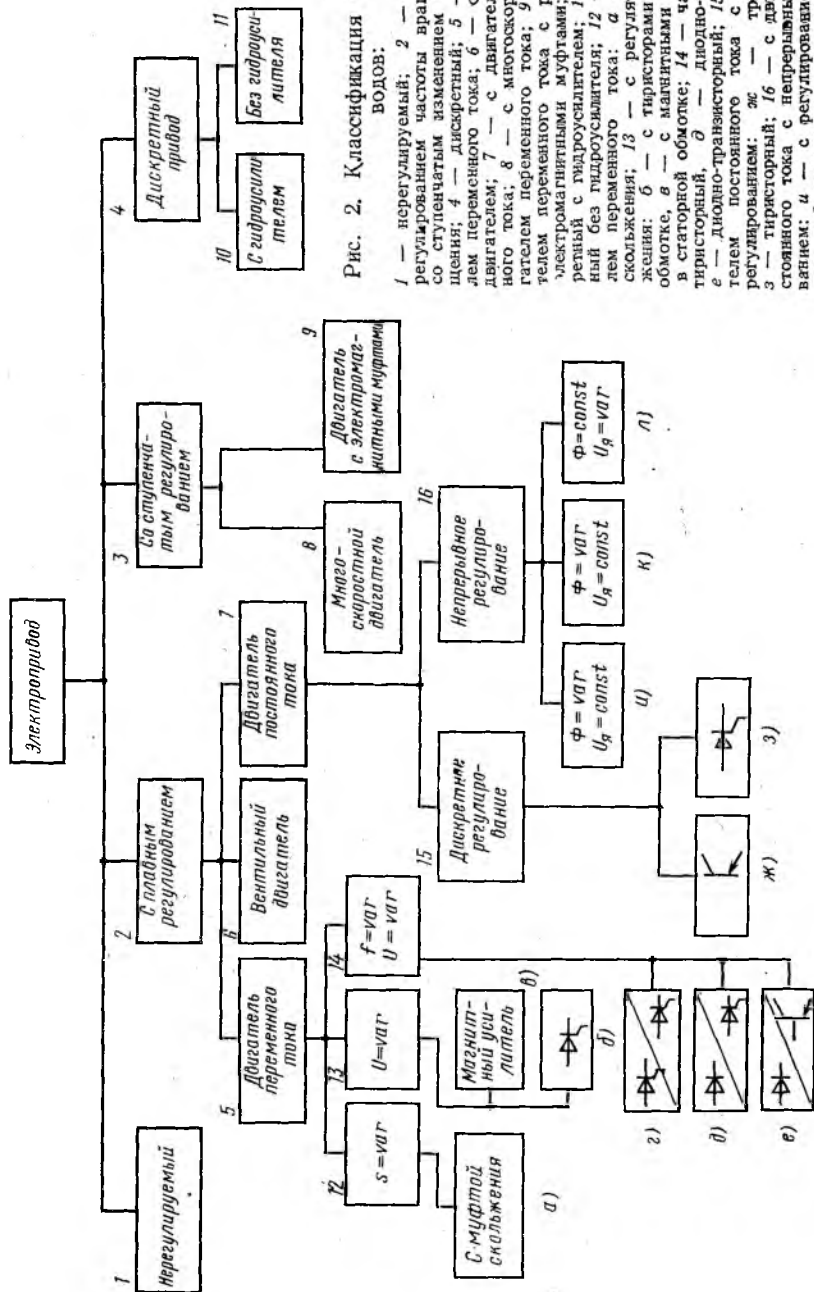


Рис. 2. Классификация электроприводов:

1 — нерегулируемый; 2 — с плавным регулированием частоты вращения; 3 — со ступенчатым изменением частоты вращения; 4 — дискретный; 5 — с двигателем переменного тока; 6 — с вентильным двигателем; 7 — с двигателем постоянного тока; 8 — с многоскоростным двигателем переменного тока; 9 — с двигателем переменного тока с редуктором и электромагнитными муфтами; 10 — дискретный с гидроусилителем; 11 — дискретный без гидроусилителя; 12 — с муфтой скольжения; 13 — с регулятором напряжения; 14 — с тиристорами в статорной обмотке; 15 — с малыми тиристорами в статорной обмотке; 16 — частотный; 17 — тиристорный; 18 — диодно-тиристорный; 19 — диодно-тиристорный; 20 — с регулируемым постоянным током с дискретным регулированием; 21 — с регулируемым постоянным током с непрерывным регулированием; 22 — с регулируемым постоянным током с непрерывным регулированием при постоянной мощности; 23 — с регулируемым постоянным моментом; 24 — с комбинированным управлением

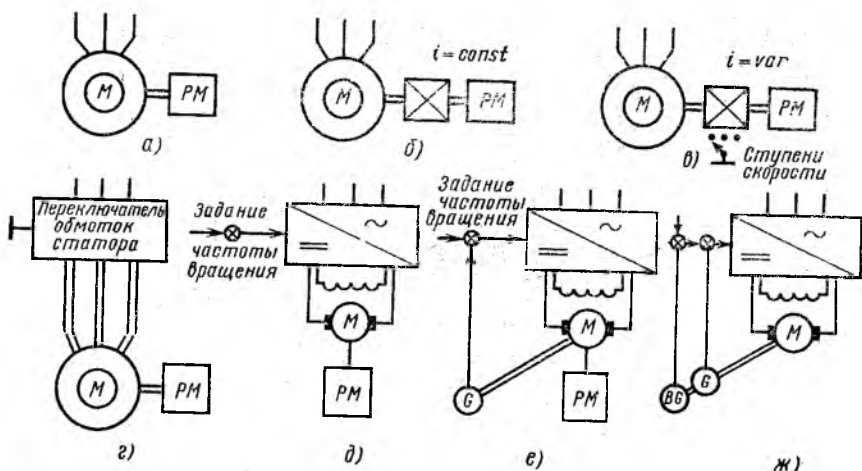


Рис. 1. Типовые схемы электроприводов

станков, в том числе и на приводы. Это — увеличение диапазонов изменения частоты вращения и повышение точности ее поддержания, сокращение времени переходных процессов частоты вращения. Наиболее полно отвечает поставленным требованиям регулируемый электропривод, широко применяемый на станках.

В книге рассмотрены электроприводы главного движения (в токарных станках — это привод вращения шпинделя, в шлифовальных — привод вращения шлифовального круга, фрезерных — привод вращения фрезы и т. д.) и подачи (инструмента или заготовки). В табл. 1 приведены требования к этим приводам (СТСЭВ 3573—82).

Регулируемые по частоте вращения электроприводы можно подразделить на приводы постоянного, переменного тока и дискретные системы. Из приводов переменного тока наиболее перспективен привод с частотным управлением асинхронным электродвигателем. Подобные системы применяют для регулирования частоты вращения высокоскоростных приводов внутришлифовальных, координатно-шлифовальных и заточных станков. Максимальная частота вращения достигает для заточных станков 9000 об/мин и для внутришлифовальных (200÷240)10<sup>3</sup> об/мин. Приводы с частотным управлением применяют также, когда требуется изменять частоту вращения перемещения рабочего органа станка в пределах 1:10, но при этом чрезвычайно важно иметь малые размеры двигателя, устанавливаемого на подвижной части станка. Преимущества частотно-регулируемого привода наиболее заметны при применении электродвигателей закрытого исполнения (например, для приводов шлифовальных станков), так как асинхронные двигатели имеют меньшие размеры, массу, уровень шума и вибраций, чем двигатели постоянного тока.

Широкое применение получил дискретный электропривод, особенно для станков с ЧПУ. Маломощные дискретные двигатели используют в приводах подачи шлифовальных станков. Основным преимуществом дискретного электропривода является, то, что он представляет собой систему разомкнутого типа, так как, не имея датчика обратной связи, по положению вала двигателя может осуществлять его перемещения с необходимой частотой вращения, изменяемой в широких пределах.

Привод постоянного тока наиболее часто применяют в механизмах станков, где необходимо регулировать частоту вращения рабочих органов. Системы генератор — двигатель, электромашинный усилитель — двигатель и магнитный усилитель — двигатель в станочном электроприводе постоянного тока заменяют тиристорными и транзисторными электроприводами. Эти приводы отличаются меньшими размерами преобразователей, повышенным быстродействием и увеличенным диапазоном регулирования.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Регулируемые приводы широко применяют в связи с их преимуществами перед нерегулируемыми. Они обеспечивают более высокую производительность труда, выбор оптимальных технологических режимов, возможность реализации автоматических циклов и работы в системах с ЧПУ. Из многочисленных систем регулируемых электроприводов получили распространение: генератор — двигатель (Г-Д) или электромашинный усилитель — двигатель (ЭМУ-Д), магнитный усилитель — двигатель (МУ-Д), привод с электромагнитной муфтой скольжения (ПМС), тиристорный (транзисторный) электропривод (ТП-Д).

Наличие трех электрических машин в составе приводов по системе Г-Д и ЭМУ-Д усложняет эксплуатацию, создает шум и требует большой производственной площади. У привода системы Г-Д суммарная мощность примерно в 4 раза превышает полезную, у ПМС — почти в 2 раза. Недостатком привода системы ПМС является повышенный нагрев муфты, ограничивающий их применение в станках, так как нагрев муфты ухудшает точность обработки заготовок.

Тиристорные приводы по сравнению с другими системами приводов имеют меньшие размеры, массу и более высокий КПД. Начинают широко внедряться транзисторные электроприводы, обеспечивающие высокое быстродействие. Классификация электроприводов показана на рис. 2.

**Основные понятия электропривода.** Согласно ГОСТ 16593—79 «Электропривод. Термины и определения» основными понятиями являются групповой, индивидуальный и многодвигательный приводы. К групповым приводам относят приводы, где один двигатель обслуживает группу станков через трансмиссионную передачу. Вследствие технико-экономического несовершенства групповой привод был вытеснен индивидуальным, в котором каждый станок или машина имеют собственный привод.

Электропривод различается: 1) по видам движения — вращательный, поступательный, ударный, вибрационный дискретный (вращательный и поступательный); 2) по видам передаточных устройств — безредукторный, редукторный, с электромагнитной дисковой муфтой, электромагнитной муфтой скольжения, гидромуфтой; 3) по роду тока двигателя — постоянного тока, переменного тока; 4) по видам преобразовательных устройств — с машинным и статическим преобразователем; 5) по режиму работы — длительный, кратковременный, повторно-кратковременный.

Развитие электропривода насчитывает несколько этапов: I — электроприводы с электромашинными преобразователями для изменения частоты вращения; II — электроприводы со статическими преобразователями для изменения частоты вращения.

К III этапу развития приводов относится новый электропривод серии ЭТА — электропривод тиристорный автономный. Термин автономный означает, что в комплект привода входит датчик положения, установленный на валу двигателя. Электропривод представляет собою автономное устройство, обеспечивающее регулирование частоты вращения и положения вала двигателя. Например, при изготовлении печатных плат необходимо в одной плате просверлить от 10 до 1000 (иногда и больше) отверстий. В этих отверстиях закрепляют резисторы, конденсаторы, микросхемы и другие элементы. Ручная работа при сверлении отверстий отняла бы много времени. Производство печатных плат оснащено станками с программным управлением. В программу закладывают координаты перемещения (позиционирования) сверлильной головки. Привод головки по программе поворачивает вал двигателя на заданный угол и автоматически останавливается в заданной позиции. После сверления отверстия вал двигателя совершает очередной угол поворота, останавливается и т. д. Кроме задания угла поворота предусмотрена возможность изменения скорости поворота на заданный угол.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

Основными показателями регулируемых приводов являются диапазон регулирования ( $D$ ); крутящий момент ( $M$ ); жесткость механических характеристик ( $\Delta n$ ); погрешность по нагрузке, нагреву, неравномерность вращения, несиммет-

рия при реверсе; коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности ( $\eta$ ); динамические характеристики; надежность; размеры и масса.

Диапазон регулирования  $D = n_{\max}/n_{\min}$ , где  $n_{\max}$  — максимальная и  $n_{\min}$  — минимальная частоты вращения вала двигателя. Оба значения частоты вращения соответствуют номинальной нагрузке двигателя.

При определении вращающего момента привода необходимо учитывать, что расчетной величиной является номинальный момент двигателя:  $M_{\text{пр}} = M_n K_{\text{ф}}$ , где  $K_{\text{ф}}$  — коэффициент формы тока, зависящий от схемы выпрямления и определяющий степень использования двигателя. Номинальное значение момента двигателя  $M_n = (9750 P_n) / n_n$ , где  $P_n$  — номинальная мощность двигателя, кВт.

Жесткость механических характеристик или процент уменьшения частоты вращения при номинальной нагрузке относительно частоты вращения ненагруженного двигателя  $\Delta n = (n_{\text{хх}} - n_n) 100 / n_{\text{ср}}$ , где  $n_{\text{хх}}$  — частота вращения ненагруженного двигателя;  $n_n$  — частота вращения нагруженного двигателя;  $n_{\text{ср}} = (n_{\text{хх}} + n_n) / 2$ .

Изменение частоты вращения при колебаниях напряжения сети от  $-15$  до  $+10\%$  относительно номинального  $\Delta U = 100 (n_{0,85} - n_{1,1}) / n_{1,1}$ , где  $n_{0,85}$  — частота вращения при понижении напряжения на  $15\%$ ;  $n_{1,1}$  — частота вращения при увеличении напряжения на  $10\%$ .

На точность поддержания заданной частоты вращения влияет температура окружающей среды. Погрешность (в процентах) от изменения температуры  $\Delta t = (n_{20} - n_{t_{\max}}) / n_{t_{\max}}$ , где  $n_{20}$  — частота вращения при  $20^\circ\text{C}$ ;  $n_{t_{\max}}$  — частота вращения при максимальной температуре для конкретных условий работы.

Для приводов вводятся еще два вида погрешности: неравномерность и не-симметричность вращения вала двигателя. Дело в том, что частота вращения характеризуется степенью равномерности, т. е. способностью сохранить одинаковую частоту вращения в течение продолжительного времени и даже в течение одного оборота. Степень неравномерности  $\Delta p = 2 (n_{\max} - n_{\min}) / (n_{\max} + n_{\min})$ , где  $n_{\max}$  и  $n_{\min}$  — максимальное и минимальное значения частоты вращения в течение одного оборота вала ненагруженного двигателя. Легко убедиться, что в идеальном случае  $\Delta p = 0$ .

Если при направлении вращения вала по часовой стрелке частота вращения равна частоте вращения против часовой стрелки, то симметричность вращения идеальна. На практике она отличается от идеальной. Для расчета отклонения от симметричности существует выражение  $\Delta c = 100 (n_1 - n_2) / n_1$ , где  $n_1$  — частота вращения по часовой стрелке;  $n_2$  — частота вращения против часовой стрелки.

Так как двигатель является основной частью электропривода, надо остановиться на понятии и определении КПД двигателей. Для двигателя постоянного тока, так же как для других видов устройств КПД — это отношение полезной мощности на валу двигателя к потребляемой из сети. Если  $P$  — полезная мощность,  $\Delta P$  — потери, то КПД (обозначим его  $\eta$ ):  $\eta = P / (P + \Delta P)$ .

Потери в двигателе в основном зависят от величины тока, сопротивления в цепи якоря и сопротивления щеточного контакта. Эти потери для двигателей мощностью до 2 кВт составляют 80% общих потерь. Остальные 20% приходятся на потери из-за питания якоря пульсирующим током, в стали, обмотке возбуждения и механические потери. Потери можно считать независимыми от частоты вращения  $\Delta P = 1,2 I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ , где  $I_{\text{я}}$  и  $R_{\text{я}}$  — ток и сопротивление цепи якоря двигателя. Так как полезную мощность, развиваемую двигателем, можно подсчитать как произведение момента на частоту вращения, то КПД двигателя постоянного тока  $\eta_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} n / (M_{\text{дв}} n + 1,2 I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}})$ . При неизменном возбужде-

нии  $M_{\text{дв}} = c_M I_{\text{я}}$ , после чего КПД двигателя (рис. 3)  $\eta_{\text{дв}} = \frac{1}{1 + \frac{1,2 I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}}{c_M n}}$ , где

$c_M$  — постоянный коэффициент двигателя.

Теперь можно вернуться к КПД всего привода. Очевидно, что к потерям в двигателе добавятся потери в силовом трансформаторе и преобразователе. Потери в трансформаторе слагаются из потерь в трансформаторе и стали сердечника. Для практических расчетов можно принять, что потери в трансфор-



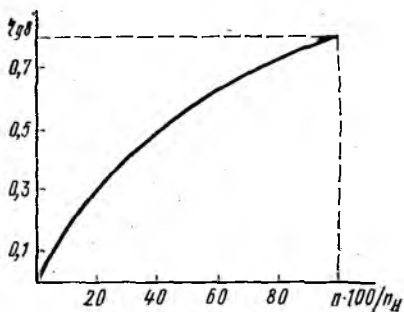


Рис. Зависимость КПД двигателя постоянного тока от его частоты вращения при номинальной нагрузке

маторе составляют 3—5 % от его номинальной мощности. Потери в преобразователе также складываются из потерь в силовых элементах (диодах, тиристорах и транзисторах) и потерь мощности для питания цепей управления. Для практических расчетов этими потерями можно пренебречь.

Остановимся на другом показателе электроприводов — коэффициенте мощности. Этот показатель отражает отношение активной мощности к полной мощности, потребляемой электроприводом из сети. Разница в этих мощностях состоит в том, что полезная мощность, развиваемая двигателем, определяется активной мощностью, которая зависит от тока и активного сопротивления цепи якоря двигателя. Но якорь имеет еще индуктивное сопротивление, на которое дополнительно затрачивается реактивная мощность. Таким образом, полная мощность двигателя учитывает активную и реактивную мощности. Для приближенных расчетов коэффициент мощности  $\chi = P_a/P_i$ , где  $P_a$  — активная мощность;  $P_i$  — полная мощность.

## НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

**Надежность** — свойство электропривода сохранять свою работоспособность и технические характеристики в течение определенного промежутка времени. Это понятие включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Основное понятие надежности — отказ (утрата работоспособности, наступающей внезапно или постепенно). Отказ может быть частичным или полным. По своему характеру отказы в работе электропривода можно разделить на три основные группы: первая группа — отказы, приводящие к максимальной частоте вращения; вторая группа — отказы, приводящие к потере устойчивости или снижению точности работы привода; третья группа — отказы, приводящие к остановке привода и срабатыванию защиты.

Количественные показатели надежности: среднее время работы ( $T_{ср}$ ) (в часах) до появления отказа; наработка на отказ ( $T_n$ ); интенсивность отказов (число отказов за 1 ч); среднее время восстановления работоспособности; вероятность безотказной работы за заданное время. Последний показатель является расчетным и зависит от интенсивности отказов и времени. В идеальном случае он равен единице. Удовлетворительным значением этого показателя является 0,9 в течение 10000 ч.

**Долговечность** электропривода называется его свойство сохранять работоспособность до наступления состояния, после которого необходим ремонт.

**Ремонтпригодность** — это приспособленность привода к предупреждению, обнаружению и устранению отказов. Она характеризуется затратами времени на устранение отказа.

Необходимо остановиться на способах повышения надежности. В первую очередь — это введение в схему электропривода избыточности, т. е. повышению надежности способствует снижение электрической нагрузки на элементы схемы. Например, заменить неисправный конденсатор, рассчитанный на 160 В, на конденсатор с напряжением 250 В той же емкости или заменить при необходимости резистор с рассеиваемой мощностью 20 Вт резистором на 30 Вт и т. д.

Другим способом повышения надежности является применение аналогичных элементов с повышенными показателями надежности. Большим резервом повышения надежности и ремонтпригодности является наличие запасных частей. Например, наличие запасной печатной платы позволяет быстро заменить вышедшую из строя.

Выполнение этих и других мероприятий будет способствовать повышению надежности электроприводов. Если к этому добавить ряд известных профилакти-

тических мероприятий, таких как периодическая очистка преобразователя, двигателя и тахогенератора от пыли и грязи, подтяжка винтовых контактов и т. д., то надежность работы электропривода будет существенно повышена. В заключение приведем расчетные значения показателей надежности для наиболее распространенных промышленных серий электроприводов (табл. 2).

## 2. ДАННЫЕ ПО НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Серия привода	Вероятность безотказной работы (при определенном числе часов наработки)	Наработка на отказ, ч	Срок службы, год
ЭТ1Е1	0,9 (4000)	6000	10
ЭТ1Е2			
ЭТ3И	0,9 (16000)	10000	10
ЭТ6	0,9 (1000)	10000	20
ЭТУ3601	0,9 (4000)	8000	15
ЭШИР-1	0,85 (4000)	8000	15

## ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ СТАНОЧНЫХ ПРИВОДОВ

### ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Частота вращения электродвигателя зависит от напряжения на якоре, тока нагрузки и магнитного потока в цепи возбуждения  $n = (U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (c_e \Phi 10^{-8})$ , где  $n$  — частота вращения якоря, об/мин;  $U_{\text{я}}$  — приложенное к якору напряжение, В;  $I_{\text{я}}$  — ток в цепи якоря, А;  $R_{\text{я}}$  — активное сопротивление якоря, Ом;  $\Phi$  — магнитный поток цепи возбуждения, Вб;  $c_e$  — коэффициент, зависящий от размеров и конструкции двигателя.

Из формулы видно, что изменять частоту вращения двигателя можно за счет изменения напряжения  $U_{\text{я}}$  и магнитного потока  $\Phi$ . Чем отличаются эти способы? Чтобы ответить на этот вопрос надо вспомнить, что момент, развиваемый двигателем, зависит от тока в цепи якоря и магнитного потока:  $M = c_m I_{\text{я}} \Phi$ , где  $c_m$  — коэффициент, зависящий от конструкции и типа машины.

Если ток в обмотке возбуждения не изменять или вместо электромагнитного возбуждения применить постоянные магниты, то  $M$  зависит только от  $I_{\text{я}}$ . Если момент нагрузки находится в пределах от холостого хода до номинального, мощность двигателя пропорциональна частоте вращения. Этот режим называют регулированием частоты вращения по постоянному предельному моменту ( $M = \text{const}$ ).

Если менять магнитный поток при постоянном значении тока  $I_{\text{я}}$ , момент, развиваемый двигателем, будет изменяться.

При соответствующем уменьшении магнитного потока мощность  $P = \frac{Mn}{9750}$  практически остается неизменной. Этот режим называют регулированием частоты вращения при постоянной мощности ( $P = \text{const}$ ). На рис. 4 показаны оба режима регулирования.

Как же меняется мощность двигателя с изменением частоты вращения? Учитывая, что мощность — это произведение  $Mn$ , лег-

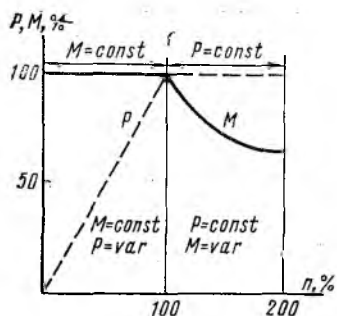


Рис. 4. Зависимость момента и мощности двигателя от частоты вращения

выдающих постоянный ток практически без всяких пульсаций. Практика показывает, что подавляющее большинство двигателей постоянного тока питается пульсирующим током, получаемым от различных преобразователей переменного тока в постоянный. Отклонение действительной формы тока от идеальной вызывает ухудшение условий работы двигателя. При этом наиболее важным является вопрос, связанный с дополнительным нагревом двигателя, который происходит за счет появления переменной составляющей пульсирующего тока, увеличивающей потери в стали якоря. В результате этого возникает разница между средним и действительным значениями тока в цепи якоря. Эта раз-

ко прийти к выводу, что в режиме  $M = \text{const}$  при уменьшении частоты вращения падает мощность, в режиме ослабления магнитного потока она практически не зависит от частоты. Существуют способы одновременного изменения напряжения на якоре и магнитного потока [10].

**Влияние пульсирующего тока на характеристики двигателя постоянного тока.** Двигатель постоянного тока рассчитан для питания «чистым» постоянным током. Такой ток получается от аккумуляторных батарей, генераторов постоянного тока и других источников,

### 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Серия	Диапазон мощностей, кВт	$n_n$ , об/мин	Особенности серии	Серии электроприводов, в которые входят электродвигатели
П	0,13—200	750, 1000, 1500, 3000	Защищенные и закрытого исполнения	ПМУ, ЭТ1Е, ЭТ1Е2
ПБС	0,8—7,4	1000, 1500, 2200, 3000	Закрытого исполнения	ЭТТ1, БТУ3601
ПС, ПСТ	0,12—0,9	1000, 1500, 2200, 3000	То же	ЭТЗ1, ЭЗШР
ПГТ	До 2		С гладким якорем	
ПБВ	0,75—17,5	1000, 750, 500	С постоянными магнитами и тахогенераторами	ЭТЗ1, БУ360Ц
ДК-1	0,17—0,52	1000	Закрытые с тахогенераторами и датчиками положения	ЭТЗ1
ДПУ	0,25—1,1	3000	С дисковым якорем и постоянными магнитами	ЭТЗ1
2П	0,2—200	500, 600, 750, 1000, 1500, 2200, 3000	Высота оси вращения 90—315 мм, защищенные, закрытые, с независимой вентиляцией. Исполнение без и с тахогенератором	ЭТ1Е2

Рис. 5. Напряжение на схеме однополупериодной (а), двухполупериодной (б), трехфазной с нулем (в) трехфазного моста (г) и идеальное выпрямленное напряжение (д)

ность оценивается коэффициентом формы тока  $K_f$ . На рис. 5 показаны кривые пульсирующего тока в зависимости от схемы выпрямления.

Питание двигателя пульсирующим током не обеспечивает полного использования двигателя по моменту, а следовательно, и по мощности. Это связано с тем, что момент двигателя пропорционален среднему значению тока якоря, а его нагрев — эффективному, т. е. при питании двигателя пульсирующим током его надо недогружать, иначе он перегреется.

**Электродвигатели постоянного тока.** В табл. 3 приведены технические данные электродвигателей постоянного тока. По сравнению с серией П серия 2П имеет при той же высоте осей вращения повышенную мощность, уменьшенный момент инерции, удвоенный срок службы, расширенный диапазон регулирования частоты вращения, сниженный уровень шума, повышенную перегрузочную способность.

Освоены двигатели с гладким якорем, обеспечивающим высокое быстродействие. В отличие от обычных двигателей у двигателей с гладким якорем отсутствуют якорные пазы. Обмотка якоря крепится на его поверхности, что обеспечивает более хорошие условия теплоотдачи. Благодаря этому пусковые токи этих двигателей в 8—10 раз превышают номинальные, что обеспечивает их высокое быстродействие. Например, время разгона двигателей с гладким якорем не превышает 0,05 с, в то время как у двигателя с обычным якорем оно равно 0,4—0,6 с.

Другим видом быстродействующих двигателей являются дви-

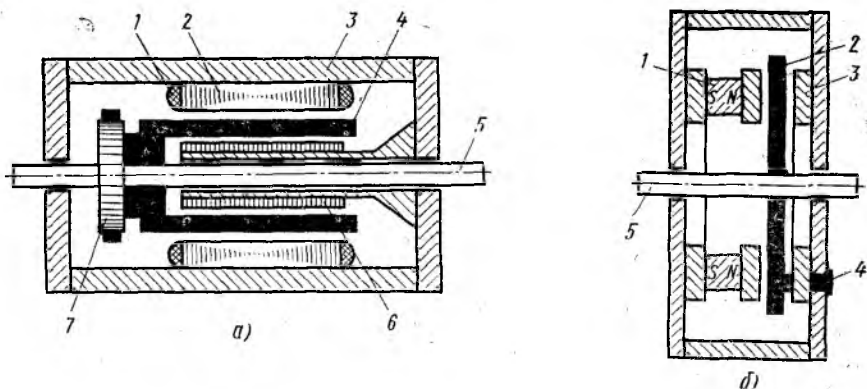


Рис. 6. Малоинерционные двигатели с полым (а) и дисковым (б) якорями

гатели с малоинерционным ротором. Конструкция двигателя (рис. 6, а) с полым цилиндрическим якорем состоит из обмотки возбуждения 1, располагающейся на полюсах 2 магнитопровода, укрепленного в статоре 3. Якорь 4 выполнен в виде полого пластмассового цилиндра, в который запрессованы проводники обмотки якоря. Ток к обмотке якоря подводится через коллекторно-щеточный узел 7. Внутри полого якоря располагается сердечник 6, являющийся частью магнитопровода двигателя (внутренний статор). При такой конструкции вращаются только якорь и связанный с ним вал 5 двигателя.

На рис. 6, б представлена конструкция быстродействующих двигателей с дисковым якорем, выполненный в виде немагнитного диска 2, на котором печатным способом наносятся витки его обмотки. Дорожки — проводники обмотки якоря располагаются радиально по обе стороны диска и соединяются через его отверстия. Диск помещен в зазор магнитной системы двигателя, образованной полюсами 1 постоянного магнита и ферромагнитными кольцами 3. Диск укреплен на валу 5. Ток к обмотке якоря подводится через щетки 4. Коллектором являются изолированные промежутки между дорожками диска. Так устроены двигатели серии ДПУ, у которых предусмотрено исполнение с пристроенным тахогенератором.

Отдельно надо остановиться на линейных двигателях, обеспечивающих не вращательное, а поступательное движение, что способствует упрощению или полному исключению кинематических передач, служащих для превращения вращательного движения в поступательное. Линейные двигатели могут быть асинхронными, синхронными и постоянного тока. Последние получили применение для небольших перемещений органов производственных механизмов с высокой точностью и в некоторых приводах подач малых станков.

**Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами для станков с ЧПУ.** К двигателям для станков с ЧПУ предъявляются особые требования, среди которых можно отметить высокие динамические качества, необходимые для создания больших ускорений, высокую перегрузочную способность, диапазон регулирования 1:10 000, высокую равномерность вращения на малых частотах вращения, достигающих до 0,1 об/мин. В наибольшей степени этим требованиям отвечают двигатели с постоянными магнитами в цепи возбуждения. Их называют высокомоментными потому, что эти двигатели по сравнению с обычными имеют повышенный крутящий момент. Это обусловлено высокими магнитными свойствами постоянных магнитов и возможностью увеличения магнитного потока за счет размещения большего количества магнитов в связи с отсутствием обмоточных проводов. Высокомоментные двигатели имеют частоту вращения в пределах 500—1000 об/мин, что позволяет в большинстве случаев приводить в движение ходовой винт механизма подачи без редукторов и различных механических передач.

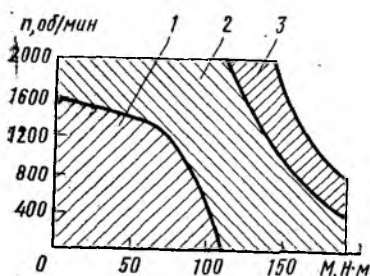


Рис. 7. Зависимость момента двигателя от частоты вращения в областях работы:

1 — длительной; 2 — кратковременной; 3 — в переходном режиме

Почему же двигатель с постоянными магнитами нашел широкое применение в станках с ЧПУ? Кроме упрощения кинематических передач, он обеспечивает максимальное быстродействие, т. е. время пуска, реверса и торможения — а эти режимы занимают до 50% рабочего времени — имеет минимальное значение. Это можно объяснить свойством такого двигателя, позволяющего на минимальной частоте вращения работать с высоким допустимым отношением пускового момента к номинальному. Если в обычных двигателях это отношение лежит в пределах двух—четырех, то в высокомоментных оно составляет 10—15. Согласно второму закону Ньютона ускорение  $a = F/m$ , где  $F$  — сила;  $m$  — масса тела. Для электродвигателя вместо силы удобнее ввести понятия крутящего момента и момента инерции  $a = M_n/I$ ,  $M_n$  — максимальный момент, развиваемый двигателем при пуске;  $I$  — момент инерции якоря двигателя и приводимого им в движение механизма. Отсюда видно, что чем больше пусковой момент, тем больше ускорение или тем больше быстродействие. На практике применяют упрощенную формулу для определения ускорения  $a_{ср} = 0,63n_n/\tau_{0,63}$ , где  $n_n$  — номинальная частота вращения двигателя;  $\tau_{0,63}$  — время его разгона до  $2/3n_n$ , с (хорошим значением ускорения  $a$  следует считать 1000—2000 рад/с<sup>2</sup>).

На рис. 7 приведена типовая зависимость момента двигателя от частоты вращения. Наибольший момент двигатель развивает при малых частотах вращения. С ростом частоты вращения допустимое значение  $M$  уменьшается. Это необходимо учитывать при разработке схемы токоограничения. Если для обычных двигателей кратность токоограничения постоянна, то для высокомоментных двигателей необходимо, чтобы пусковой ток якоря снижался с ростом частоты вращения. В противном случае мы не сможем полностью использовать свойство высокомоментного двигателя развивать большие ускорения на малых частотах вращения, поскольку настройка цепи токоограничения на максимально допустимую кратность на всем диапазоне регулирования приведет к выходу из строя двигателя в режиме работы на наибольшей частоте. Это связано с конструктивной особенностью коллекторных узлов этих двигателей, заключающейся в увеличенном числе коллекторных пластин из-за отсутствия добавочных полюсов, предназначенных для улучшения условий коммутации, т. е. для уменьшения искрообразования под щетками при вращении коллектора. Исключение добавочных полюсов можно объяснить возможностью увеличения развиваемого двигателем момента за счет установки на их место дополнительных постоянных магнитов. Ограничение искро-

образования при отсутствии дополнительных полюсов достигается увеличением числа коллекторных пластин, что уменьшает напряжение между коллекторными пластинами, а следовательно, уменьшается искрообразование. Минимальное расстояние между пластинами при токовой перегрузке приводит к пробое и аварийной ситуации. Поэтому двигатели с постоянными магнитами требуют особого внимания и надежной защиты от перегрузок.

Технико-экономический эффект от применения высокомоментных двигателей складывается из повышения производительности станка и упрощения его кинематической цепи. Повышение производительности достигается за счет увеличения скорости быстрых перемещений, большого диапазона регулирования скорости и высоких динамических показателей. Например, замена двигателей серий ПГТ на высокомоментные двигатели на станке 6560 МФЗ-2 позволила увеличить скорость быстрого перемещения с 4,8 до 9,6 м/мин, а время разгона и торможения уменьшить на 0,5 с. В результате время выхода в заданную координату уменьшается в 2 раза и производительность станка повышается на 18%.

### ДИСКРЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В отличие от обычных двигателей, вал которых вращается равномерно, в дискретных (шаговых) двигателях (ШД) вал вращается прерывисто. Минимальный угол поворота вала (дискрета) составляет  $1,5^\circ$ . Встречаются и другие величины дискрет. Двигатель (рис. 8) имеет на статоре две пары полюсов, на которых находится обмотка возбуждения *I* с выводами *1Н* и *1К* и обмотка *II* с выводами *2Н* и *2К*. Каждая из обмоток состоит из двух частей (полуобмоток), находящихся на противоположных полюсах двигателя. Полуобмотки соединены между собою таким образом, что при подаче на обмотку постоянного напряжения одной полярности образуется система из двух разноименных полюсов *N—S*, а при противоположной полярности — *S—N*.

Питание осуществляется импульсами напряжения, поступающими с выхода системы управления в определенной последовательности. Ротор представляет собой двухполюсный постоянный магнит, расположенный на валу двигателя внутри статора. Рассмотрим работу ШД при условии, что в начальный момент напряжение подано на обмотку *I*. Прохождение тока по этой обмотке вызовет появление магнитного поля ротора с вертикально расположенными полюсами

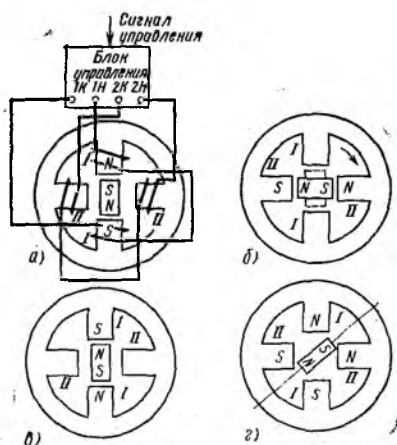


Рис. 8. Устройство дискретного двигателя

**Н—S.** Взаимодействие постоянного магнита ротора с полем приводит к тому, что ротор займет указанное на рис. 8,а равновесное положение, в котором оси магнитных полей статора и ротора совпадают. Положение будет устойчивым, так как при отклонении от него на ротор будет действовать момент, возвращающий ротор в состояние равновесия.

Допустим, что с помощью системы управления напряжение снимается с обмотки *I* и подается на обмотку *II*. В результате магнитное поле статора поворачивается на  $90^\circ$ . Возникающий при этом момент «доворачивает» ротор на те же  $90^\circ$ , после чего вновь наступает устойчивое равновесие (рис. 8,б). Если теперь отключить обмотку *II*, а на обмотку *I* подать напряжение противоположного знака, то произойдет реверс и ротор вновь займет положение, показанное на рис. 8,а.

Можно при этой же конструкции уменьшить шаг ротора в 2 раза (вместо  $90^\circ$ — $45^\circ$ ). Допустим, что исходное положение двигателя соответствует схеме рис. 8,в. Подключим обмотку *II*, не отключая обмотку *I*. В результате взаимодействия всех магнитных полей ротор повернется на  $45^\circ$  (рис. 8,г). Для совершения следующего шага достаточно снять напряжение с обмотки *I*. Следующий поворот произойдет при подключении обмотки *I* на напряжение противоположной полярности без отключения обмотки *II* и т. д.

Вращение вала двигателя осуществляется с помощью последовательных управляющих импульсов, при этом каждому импульсу соответствует одно переключение обмоток двигателя и один шаг ротора. Установившийся режим работы характеризуется постоянной частотой управляющих импульсов. При большой частоте импульсов ШД начинает вращаться равномерно.

Пуск двигателя осуществляется скачкообразным или постепенным увеличением частоты импульсов. Максимальная частота импульсов, при которой пуск ШД происходит без пропуска шагов, называется частотой приемистости. Она зависит от электромеханических и электромагнитных параметров двигателя, а также от нагрузки.

В зависимости от числа фаз двигателя и устройства магнитной системы ШД бывают однофазными, двухфазными и многофазными с активным или пассивным ротором. Активный ротор состоит из постоянных магнитов или содержит обмотку возбуждения. Наиболее широкое распространение получили магнитоэлектрические ШД. Максимальная частота вращения у них составляет 3000 об/мин, крутящие моменты — до 0,01 Н·м, а частота приемистости — до 500 Гц.

ШД с пассивным ротором (не имеющим на зубцах обмотки возбуждения), обеспечивают дискрету до  $1,5^\circ$ . Они делятся на реактивные и индуктивные. Принцип действия их основан на взаимодействии магнитного поля и ферромагнитного сердечника с явно выраженными полюсами. По законам электромагнитной индукции такой сердечник, помещенный в магнитное поле, стремится



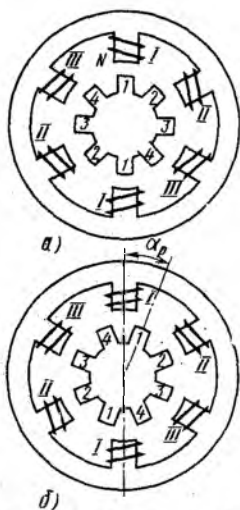


Рис. 9. Реактивный дискретный двигатель

занять положение, при котором силовые линии внешнего магнитного поля имеют минимальную длину.

Статор реактивного двигателя (рис. 9) имеет зубцы (явно выраженные полюсы) с расположенными вокруг них обмотками возбуждения, получающими питание от источника импульсного напряжения. Ротор двигателя, выполненный из ферромагнитного материала, не имеет на зубцах обмотки возбуждения. Число зубцов статора меньше числа зубцов ротора. При этом пара диаметрально противоположных зубцов ротора соосна с парой диаметрально противоположных зубцов статора.

Предположим, что в исходном положении (рис. 9,а) подано напряжение на обмотку, расположенную на паре зубцов I статора. Ротор при этом находится в положении устойчивого равновесия. Снимем напряжение с первой обмотки и подадим его

на вторую. Это вызовет поворот магнитного поля на  $60^\circ$ , а зубцы ротора повернутся на угол  $\alpha_p$  (рис. 9,б), соответствующий минимальной длине магнитных линий между зубцами ротора и статора. Ротор займет равновесное положение. Отключение обмотки II и включение III приведет к новому повороту ротора на тот же угол  $\alpha_p = \tau_c - \tau_p$ , где  $\tau_c$  и  $\tau_p$  — шаги зубцов статора и ротора;  $\tau_c = 360/z_c$ ;  $\tau_p = 360/z_p$ , где  $z_c$ ,  $z_p$  — число зубцов на статоре и роторе. Окончательно  $\alpha_p = 360(z_p - z_c)/z_p z_c$ . Например, при  $z_c = 6$  и  $z_p = 8$   $\alpha_p = 15^\circ$ . Уменьшая разность чисел зубцов  $z_p$  и  $z_c$ , можно снижать дискрету ШД.

К недостаткам ШД с пассивным ротором следует отнести малые моменты, а следовательно, и малые мощности. Промышленностью выпускаются двигатели с шагом от  $1,5^\circ$  до  $9^\circ$ ; моментом до  $0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и частотой приемистости до  $8000 \text{ Гц}$ .

## ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Асинхронные двигатели.** Широкое применение в станочных приводах получили трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором. Напомним основные характеристики асинхронных двигателей. Частота вращения ротора двигателя на холостом ходу без учета механических потерь называется синхронной. Разность синхронной частоты вращения (идеального холостого хода) и частоты вращения ротора, отнесенная к синхронной частоте вращения, называется скольжением  $s = (n_c - n)/n_c$ .

Механическая характеристика двигателя — это зависимость, связывающая момент и частоту вращения (рис. 10). Механическая характеристика  $M = f(n)$  в двигательном режиме состоит из двух

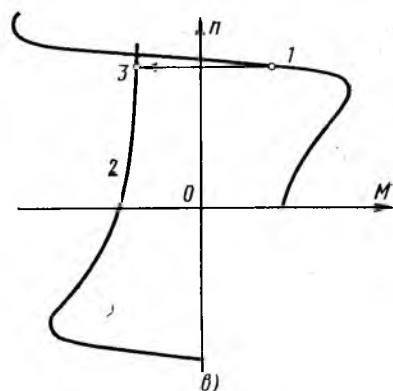
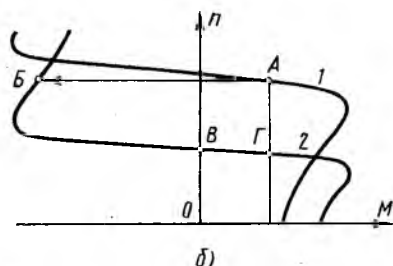
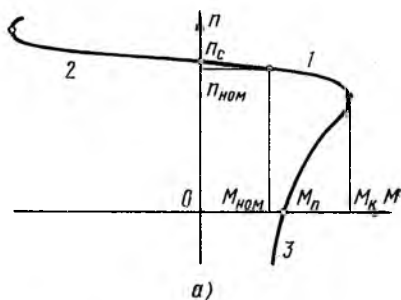
**Рис. 10.** Механические характеристики асинхронных двигателей:

— односкоростного: 1 — двигательный режим, 2 — генераторный режим, 3 — режим противовключения; б — двухскоростного; в — при реверсе

участков: рабочего — от точки холостого хода до точки критического момента  $M_K$ ; и участка от точки с нулевой частотой вращения и пусковым моментом  $M_n$  до критической точки. Критической точке соответствует максимальное значение момента ( $M_K$ ).

Чем больше момент сопротивления нагрузки на рабочем участке механической характеристики, тем больше скольжение и меньше частота вращения ротора. Механическая характеристика двигателя при его питании от сети с номинальными параметрами и без дополнительных элементов называется естественной (или паспортной). На кривой механической характеристики двигателя имеется точка, которой соответствуют номинальные величины момента ( $M_{ном}$ ), частоты вращения ( $n_{ном}$ ), тока ( $I_{ном}$ ) и др. Кратковременно двигатель может работать с моментом, большим номинального, без опасности перегрева. Одним из важнейших параметров двигателя является перегрузочная способность, равная отношению критического (максимального) момента к номинальному. Эта величина составляет обычно 1,7—2,2. Пусковой момент короткозамкнутых двигателей равен  $(1 \div 2) M_{ном}$ . При этом пусковой ток превышает номинальный в 5—8 раз.

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, при прочих одинаковых условиях пропорционален квадрату питающего напряжения. Поэтому при допустимом снижении напряжения сети на 15% критический момент может составлять 0,72 от паспортного значения. Это обстоятельство следует учитывать при выборе двигателя, чтобы момент нагрузки даже кратковременно не превышал указанной величины, иначе произойдет «опрокидывание» двигателя. При этом двигатель переходит с устойчивого рабочего участка на неустойчивый участок характеристики и останавливается.



Кроме двигательного режима асинхронная машина может работать в генераторном режиме с возвратом энергии торможения в сеть и в режиме противовключения (рис. 10, а). В генераторном режиме с возвратом энергии в сеть — рекуперацией (участок характеристики) частота вращения выше синхронной. При этой энергии двигателя возвращается в сеть. В станочных приводах генераторный режим с рекуперацией возможен, если многоскоростной двигатель переключается с большей синхронной частоты вращения на меньшую или при снижении частоты питания двигателя. На рис. 10, б показаны две механические характеристики двигателя: 1 — с большей синхронной частотой вращения и 2 — меньшей синхронной частотой вращения. Предположим, что первоначально машина работала в двигательном режиме (точка А). При переключении числа пар полюсов машина из точки А перейдет в точку Б. Частота вращения будет замедляться: сначала по участку характеристики генераторного торможения с рекуперацией — до точки В новой синхронной частоты вращения, затем по участку двигательного режима — до точки Г, соответствующей моменту нагрузки.

На начальном этапе реверса или при торможении асинхронные машины станочных приводов работают на третьем участке механической характеристики (противовключение). Чтобы изменить направление вращения — реверсировать асинхронный двигатель надо переключить подсоединение любых двух из трех выводов двигателя к фазам сети. Если реверс производится при включенном двигателе, то машина переходит с характеристики 1 на характеристику 2 (рис. 10, в). При этом возникает значительный скачок тока и большой ударный момент.

После замедления двигатель разгоняется в обратном направлении. Недостатками торможения противовключением являются большой ток статора и отсутствие нулевого значения тормозного момента при остановке двигателя. Для остановки двигателя приходится применять реле контроля скорости. При достижении нулевой частоты вращения реле дает команду на отключение двигателя. В противном случае двигатель разгонится в обратном направлении. Для ограничения токов и ударных моментов в некоторых случаях в цепь статора включают резисторы. Кроме того, исключение ударных моментов достигается обеспечением паузы

после отключения контактора двигательного режима и до включения контактора реверса (противовключения).

Ниже рассмотрены другие способы торможения, связанные со специальными схемами включения двигателя. При подключении обмоток двигателя к источнику постоянного тока (после отключения первого от сети) реа-

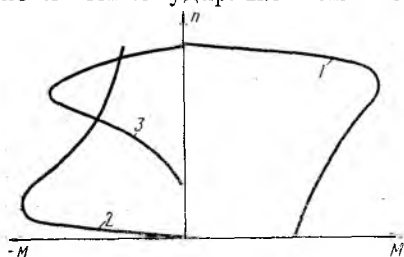


Рис. 11. Механические характеристики двигателя при торможении

Используется динамическое торможение. При подаче постоянного напряжения в статоре создается неподвижное магнитное поле, а во вращающемся роторе индуцируется переменный ток. В результате машина развивает тормозной момент. Величина тормозного момента зависит от тока статора, который определяется значением приложенного напряжения. Ограничивает величину тормозного момента магнитное насыщение двигателя.

Механическая характеристика, соответствующая динамическому торможению (кривая 2), представлена на рис. 11 (где 1 — двигательный режим). На нулевой частоте вращения тормозной момент равен нулю. После задержки, достаточной для окончания торможения, необходима команда от реле времени на приведение схемы в исходное положение. В противном случае перегреваются обмотки двигателя.

Конденсаторное торможение (рис. 11, кривая 3) предусматривает подсоединение конденсаторов параллельно цепям статора. После отключения от сети машина самовозбуждается и образуется тормозной момент. Этот вид торможения характеризуется большим тормозным моментом на высоких частотах вращения и малым — на низких. Начиная с некоторой частоты вращения, тормозной момент отсутствует, что может привести к длительному выбегу. При разных величинах емкости конденсатора механические характеристики при торможении смещаются по оси частот вращения. Имеются различные способы подключения конденсаторов: постоянное или только после отключения двигателя от сети. При постоянном подключении конденсатора повышается коэффициент мощности двигателя. Но при данном способе приходится устанавливать конденсаторы больших размеров.

Известен способ торможения коротким замыканием цепей статора, которое осуществляется после отключения двигателя от сети. На практике для достижения достаточного момента на все время торможения применяют комбинированные виды торможения: динамическое и конденсаторное, конденсаторное с коротким замыканием, динамическое и противовключение, динамическое с коротким замыканием и т. д.

Сравнивая способы торможения, можно отметить следующее. Наиболее плавное торможение — динамическое, а наиболее резкое, с наибольшими ударными моментами — торможение противовключением и комбинированное, сочетающее динамическое и торможение противовключением. Наименьшие потери в двигателе — при конденсаторном торможении, с ними соизмеримы потери при динамическом и комбинированных видах торможения.

**Серии асинхронных двигателей.** Промышленностью выпускается единая серия асинхронных короткозамкнутых двигателей 4А. Данная серия охватывает двигатели мощностью 0,06—400 кВт. Двигатели серии 4А обладают лучшими энергетическими показателями, чем двигатели серии А2. Предусмотрены два исполнения: закрытое обдуваемое и защищенное. Двигатели мощностью 0,06—

0,37 кВт выпускаются на напряжение 220 и 380 В, а двигатели от 0,55 до 11 кВт — кроме того, и на 660 В. Схема соединений обмоток статора — «треугольник» или «звезда», число выводных концов — три. Двигатели мощностью 15—400 кВт имеют напряжение 220/380 и 380/660 В с переключением с «треугольника» на «звезду». Число выводных концов — шесть. Синхронные частоты вращения — 500, 600, 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин. Условное обозначение типа двигателя расшифровывается следующим образом: 4 — порядковый номер серии; А — тип двигателя (асинхронный) исполнение двигателя по способу защиты от окружающей среды Н — защищенное, без буквы — закрытое обдуваемое; А — станина и щиты алюминиевые, Х — любое сочетание алюминия и чугуна, без букв — материал станины и щитов — чугун или сталь; высота оси вращения — три или две цифры; установочный размер по длине станины (S — короткий, M — средний, L — длинный); длина сердечника статора (А или В), отсутствие букв означает наличие только одной длины сердечника; число полюсов — 2, 4, 6, 8, 10 и 12; УЗ — климатическое исполнение и категория размещения.

Серия двигателей 4А имеет следующие модификации. Двигатели с повышенным пусковым моментом используются в механизмах с большим моментом нагрузки и большими маховыми массами, например, шлифовальные станки. Эти двигатели обладают пониженными величинами пускового тока. Данная модификация обозначается буквой Р после обозначения серии (4АР...). Для работы в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками или переменной нагрузкой служат двигатели с повышенным скольжением (рис. 12, кривая 2, кривая 1 — характеристика двигателей 4А основной серии). При повторно-кратковременном режиме двигатель работает периодически с определенным соотношением времени включенного и отключенного состояния. Эти двигатели могут применяться в кузнечно-прессовых и т. п. машинах. Этой модификации соответствует буква С в типе двигателя.

Большое распространение в станочных приводах получили многоскоростные двигатели. В индексе типа двигателя записываются

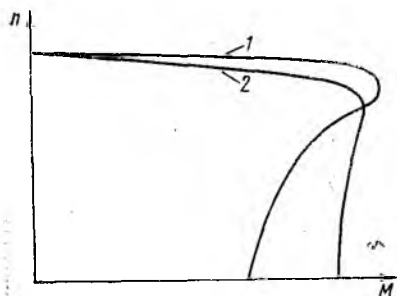


Рис. 12. Механические характеристики двигателей с повышенным скольжением

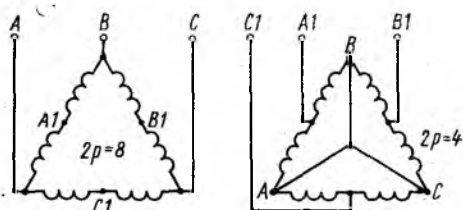


Рис. 13. Схемы обмоток многоскоростных двигателей

(через черту) переключаемые числа полюсов. Выпускают различные виды многоскоростных двигателей. Двухскоростные двигатели на синхронные частоты вращения 1500 и 3000 об/мин имеют переключаемые схемы соединения обмотки «треугольник» и «двойная звезда» (рис. 13). При переключении обмоток в «треугольник» полуобмотки фаз соединены последовательно. В случае переключения обмоток по схеме «двойная звезда» полуобмотки фаз включаются параллельно. В зависимости от схемы включения меняется направление тока в одной из полуобмоток. Так, при схеме «треугольник» направление тока при переходе от одной полуобмотки к другой чаще меняет направление, чем в схеме двойная звезда» ( $2p=4$ ), и соответственно число полюсов в 2 раза больше ( $2p=8$ ).

Производят двигатели на синхронные частоты вращения 750/1500 об/мин и на 500/1000 об/мин с указанными выше схемами обмоток. Двигатели с двумя независимыми обмотками, соединенными «звездой», имеют синхронные частоты вращения 750 и 1000 об/мин. Трехскоростные двигатели выполняют с двумя независимыми обмотками со схемами соединения «звезда», «треугольник» и «двойная звезда». Выпускают двигатели на синхронные частоты вращения 1000/1500/3000, 750/1500/3000 и 750/1000/1500 об/мин. И наконец, четырехскоростные двигатели на синхронные частоты вращения 500/750/1000/1500 об/мин. Они имеют две независимые обмотки.

Используют двигатели, рассчитанные на частоту 60 Гц, и двигатели тропического исполнения для работы в условиях влажного или сухого тропического климата. Имеется модификация единой серии встраиваемого исполнения (буква В в обозначении). Эти двигатели поставляются в виде двух отдельных частей: статора и ротора. Статор встраивается в узел станка. Двигатели поставляются с вентилятором и без вентилятора.

Кроме общепромышленных модификаций единой серии 4А, разработаны для станкостроения модификации 4АП и 4АШ. Двигатели 4АП с номинальной частотой питания 50 Гц выполнены на напряжение 127/220 В. Они имеют изоляцию обмоток более высокого класса, чем двигатели единой серии. Двигатели предназначены для регулирования частот вращения в диапазоне 1:5 вниз от номинальной и 2:1 вверх относительно номинальной частоты. Двигатели 4АШ с номинальной частотой питания 100 Гц имеют диапазон регулирования 1:5 вниз от номинальной; 1,5:1 и 2:1 (в зависимости от типоразмера) вверх от номинальной частоты. Эта серия предназначена для комплектации регулируемых приводов переменного тока. Для высокоскоростных шпинделей внутришлифовальных и координатно-шлифовальных, заточных и других станков выпускают специальные высокоскоростные двигатели — электрошпиндели. На их валы насаживаются шлифовальные круги. Производятся электрошпиндели на номинальные частоты вращения от 12 000 до 200 000 об/мин. Двигатели на частоты вращения выше 48 000 об/мин имеют водяное охлаждение.

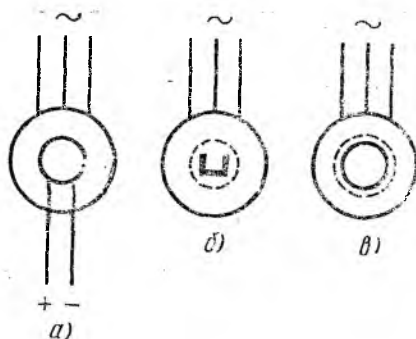


Рис. 14. Виды синхронных двигателей: а — с обмоткой возбуждения; б — с постоянными магнитами; в — синхронно-реактивный

**Синхронные двигатели.** Кроме асинхронных находят применение в станках и синхронные двигатели. Их разновидность — синхронно-реактивные машины — используется в зубошлифовальных станках. Синхронные двигатели имеют различные виды роторов: с обмоткой возбуждения, питающейся от источника постоянного тока (рис. 14,а); с постоянными магнитами (рис. 14,б); с магнитопроводом, намагничивающимся в поле статора синхронно-реактивной машины (рис. 14,в).

Вращающееся поле статора синхронного двигателя образуется так же, как и в случае асинхронного двигателя. В результате взаимодействия полей статора и ротора последний вращается синхронно с полем статора. В отличие от асинхронных двигателей частота вращения синхронных двигателей не снижается с повышением момента нагрузки. Это является их достоинством. Другим преимуществом синхронных двигателей служит возможность работы с коэффициентом мощности, близким к единице. Недостатком синхронных двигателей является необходимость в специальной пусковой обмотке для асинхронного пуска двигателей или других устройствах для обеспечения режима пуска и торможения. Синхронно-реактивные двигатели в приводах зубошлифовальных станков сохраняют частоту вращения на уровне синхронной.

Вращающееся поле статора синхронного двигателя образуется так же, как и в случае асинхронного двигателя. В результате взаимодействия полей статора и ротора последний вращается синхронно с полем статора. В отличие от асинхронных двигателей частота вращения синхронных двигателей не снижается с повышением момента нагрузки. Это является их достоинством. Другим преимуществом синхронных двигателей служит возможность работы с коэффициентом мощности, близким к единице. Недостатком синхронных двигателей является необходимость в специальной пусковой обмотке для асинхронного пуска двигателей или других устройствах для обеспечения режима пуска и торможения. Синхронно-реактивные двигатели в приводах зубошлифовальных станков сохраняют частоту вращения на уровне синхронной.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Комплект любой системы электропривода содержит преобразователь электрической энергии. Для питания двигателей постоянного тока преобразователь, питаемый от сети переменного тока, превращает его в постоянный ток. Для регулирования частоты вращения двигателей переменного тока преобразователь формирует на выходе переменный ток или напряжение изменяемой частоты.

Преобразователи можно разделить на машинные и статические. К электроприводам с машинным преобразователем следует отнести системы Г-Д и ЭМУ-Д, состоящие из подключаемого к сети двигателя переменного тока, который вращает генератор постоянного тока. Последний питает двигатель постоянного тока. Тут мы имеем машинный преобразователь переменного тока в постоянный. По мере развития полупроводниковой техники появились неуправляемые, полууправляемые и полностью управляемые силовые кремниевые приборы. К первым относят кремниевые диоды, пришедшие на смену селеновым выпрямителям, ко вторым —

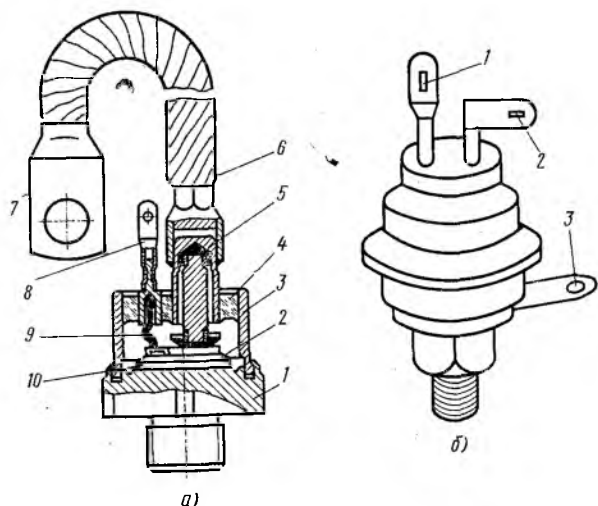


Рис. 15. Конструкция (а) и электроды (б) тиристора:  
1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод

обычные тиристоры без запираания, к третьим — силовые транзисторы и запираемые тиристоры.

Тиристорные и транзисторные электроприводы пришли на смену громоздким приводам с электромашинными и магнитными усилителями. В чем преимущество тиристоров перед другими видами управляемых приборов? Основное достоинство их состоит в совмещении функций выпрямления и изменения выпрямленного напряжения в одном элементе. Эти функции в приводах серии ПМУ выполняли два элемента — неуправляемые селеновые выпрямители и громоздкие, тяжелые магнитные усилители. В системах приводов Г-Д получение постоянного тока достигалось сочленением двигателя переменного тока с генератором постоянного тока, а изменение напряжения постоянного тока производилось путем изменения магнитного потока генератора.

### УСТРОЙСТВО И СВОЙСТВА ТИРИСТОРОВ

Тиристором (от греческого слова *thyra* — дверь и английского *resistor* — резистор) называют полупроводниковый (на кремниевой основе) прибор с четырехслойной структурой, имеющий свойства управляемого вентиля. На схемах он обозначается как диод (вентиль) с управляющим электродом на стороне катода. Конструкция тиристора показана на рис. 15, а. Он состоит из основания 1, соединенного с полупроводниковым кристаллом — анодом 2, кольца 10, гибкого внутреннего проводника 9, крышки 3, изолятора крышки 4, стержня крышки 5, вывода катода 6, управляющего электрода 8, наконечника катодного вывода 7. Конструкция, показанная на рис. 15, б, называется штыревой, так как выводы анод-



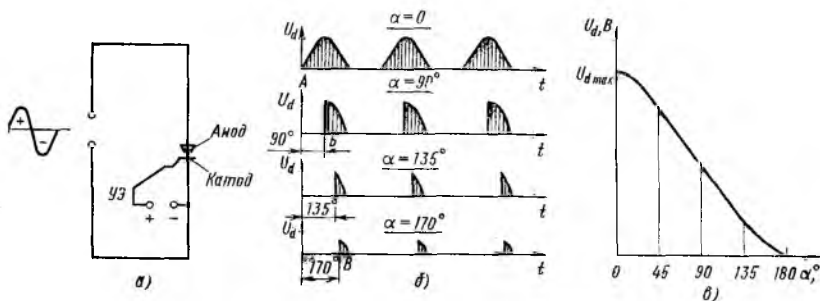


Рис. 16. Тиристор:

**а** — изображение на схемах; **б** — формирование отрезков синусоид; **в** — зависимость выпрямленного напряжения от угла зажигания

катод сделаны в виде штырей. Выпускаются таблеточные тиристоры, отличающиеся отсутствием штырей. Они меньше по размерам и поэтому более компактны.

Рассмотрим свойства тиристоров. Их основным качеством является возможность получения регулируемого по величине выпрямленного напряжения. Это достигается подачей на управляющий электрод положительного по отношению к катоду импульса, который отпирает тиристор, т. е. его сопротивление становится близким к нулю. Если к аноду и катоду (рис. 16, **а**) подключить напряжение переменного тока, а на управляющий электрод подавать управляющее напряжение положительной полярности (рис. 16, **б**) то тиристор будет работать как обыкновенный диод, т. е. синусоидальное, переменное напряжение будет преобразовываться в однополупериодную (однопульсную) форму выпрямленного напряжения.

Тиристор обладает свойством пропускать ток до тех пор, пока напряжение на анод — катод не будет равно нулю. Можно с управляющего электрода снять положительное относительно катода напряжение, но все равно до нуля переменного напряжения тиристор будет пропускать ток. Это свойство и позволяет управлять выпрямленным напряжением. Для этого достаточно подать управляющий сигнал в период положительной полуволны напряжения переменного тока. Например, если подать его в момент **А**, выпрямленное напряжение будет наибольшим ( $U_{d\max}$ ), если подать его в точке **Б**, среднее выпрямленное напряжение будет равно  $1/2 U_{d\max}$  и, наконец, в точке **В** оно будет близко нулю. Таким образом, мы получили возможность изменять выпрямленное напряжение за счет получения «отрезков синусоид». Если ширина отрезка  $180$  эл. градусов, то выпрямленное напряжение максимально, с уменьшением ширины отрезка выпрямленное напряжение соответственно уменьшается. Положение управляющего импульса относительно полуволны напряжения переменного тока удобно выразить в виде такого понятия, как угол зажигания. Обозначим его греческой буквой  $\alpha$ . Если  $\alpha = 0$  (соответствует точке **А**),  $U_d = U_{d\max}$ , если

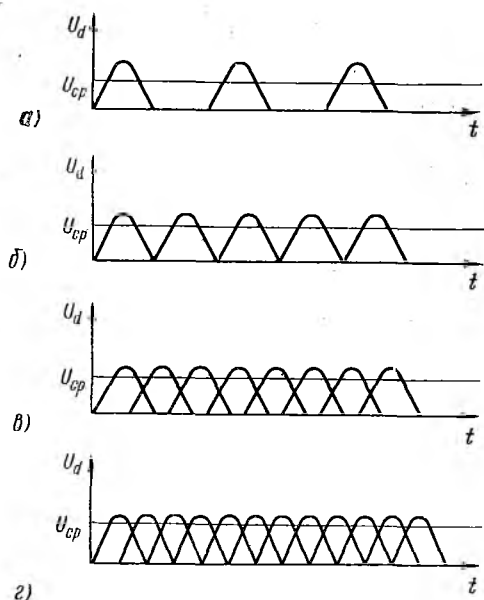
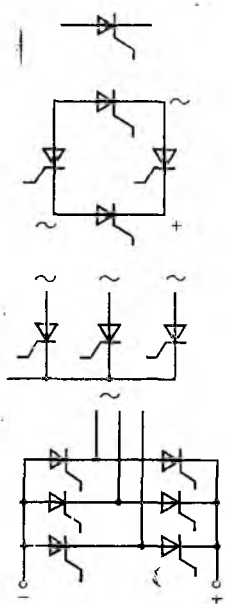


Рис. 17. Схемы выпрямления на тиристорах:

*а* — однополупериодная; *б* — двухполупериодная; *в* — трехфазная с нулем; *г* — трехфазная мостовая

$\alpha = 90^\circ$  (соответствует точке *Б*),  $U_d = 1/2 U_{d_{\max}}$  и при  $\alpha = 180^\circ$  (соответствует точке *В*)  $U_d = 0$ . Зависимость выпрямленного напряжения от угла  $\alpha$  приведена на рис. 16, в.

### РАБОТА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Показанная на рис. 16 форма выпрямленного напряжения невыгодна, так как в ней слишком много пауз, т. е. среднее выпрямленное напряжение мало. Применяют различные схемы тиристорных выпрямителей, у которых время пауз сокращается в зависимости от схемы. Например, в однополупериодной схеме (рис. 17, *а*) среднее значение выпрямленного напряжения составляет 0,45 от среднего значения сетевого напряжения; в однофазной мостовой схеме (рис. 17, *б*) — 0,9, в трехфазной с нулем схеме (рис. 17, *в*) — 1,35, в трехфазной мостовой схеме (рис. 17, *г*) — 2,7 относительно фазного напряжения.

Изменение напряжения постоянного тока для питания двигателя получают при помощи тиристорного моста, который выпрямляет напряжение переменного тока, а среднее значение напряжения постоянного тока изменяется за счет изменения угла зажигания тиристорov. Существуют комбинированные схемы выпрямления, состоящие из тиристорov и диодов и называемые полууправляемыми.

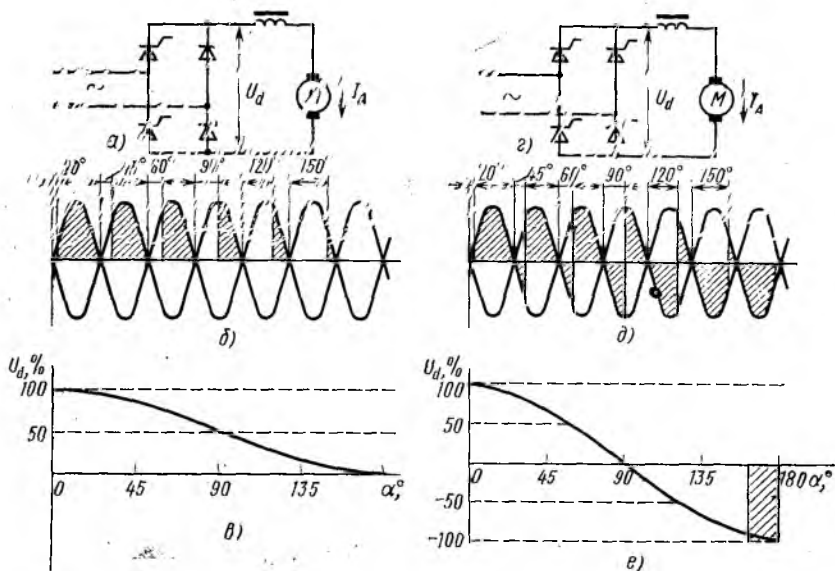


Рис. 18. Однофазные схемы выпрямления:

*а* — полупроводяемый мост; *б* — диаграмма напряжений; *в* — зависимость  $U_d=f(\alpha)$  *г* — полностью управляемый мост; *д* — диаграмма напряжений; *е* — зависимость  $U_d=f(\alpha)$

Схема выпрямления — *полупроводяемый однофазный мост* (рис. 18, *а*). На рис. 18, *б* приведена диаграмма напряжений, из которой видно, что выходное напряжение имеет только положительное значение, а его величина зависит от угла «зажигания» тиристоров. Эта зависимость приведена на рис. 18, *в* и описывается формулой  $U_d = U_{di}(1 + \cos \alpha)/2$ , где  $U_d$  — среднее значение выпрямленного напряжения;  $U_{di}$  — среднее значение выпрямленного напряжения при  $\alpha=0$ ;  $\alpha$  — угол отпирания тиристоров.

*Полностью управляемый однофазный мост* (рис. 18, *г*) позволяет получить положительные и отрицательные значения выпрямленного напряжения (рис. 18, *д*). При образовании отрицательного напряжения выпрямитель работает в качестве инвертора, т. е. преобразует постоянный ток в переменный. Зависимость  $U_d$  от угла отпирания  $\alpha$  приведена на рис. 18, *е*. Обе схемы выпрямления имеют диапазон изменения угла зажигания тиристоров  $0-180^\circ$ . Большим недостатком этих схем является наличие прерывистой формы тока.

*Полностью управляемый трехфазный мост* (рис. 19, *а*). Диаграмма напряжений приведена на рис. 19, *б*, а зависимость выпрямленного напряжения от  $\alpha$  — на рис. 19, *в*. Схема обеспечивает при определенных углах зажигания непрерывный характер тока. Выпрямленное напряжение имеет положительный и отрицательный знаки:  $U_d = U_{di} \cos \alpha$ ;  $U_{di} = 1,35 U_{\text{фазн}}$ . В области отрицательных значений напряжений возможен режим инвертирования. При углах регулирования  $2-60^\circ$  ток имеет прерывистую форму.

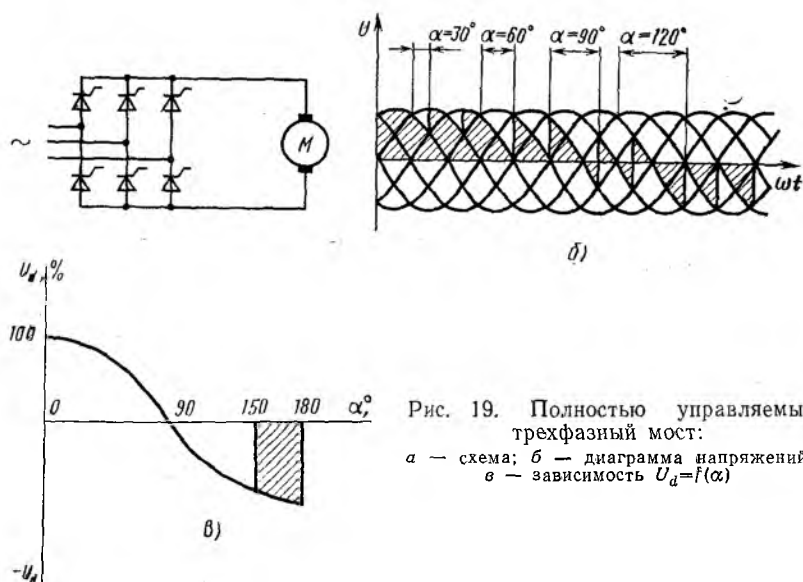


Рис. 19. Полностью управляемый трехфазный мост:  
 а — схема; б — диаграмма напряжений;  
 в — зависимость  $U_d = f(\alpha)$

Реверсивные схемы выпрямителей состоят из двух встречно-ключенных одно- или трехфазных мостов (рис. 20, а). Если в ка-

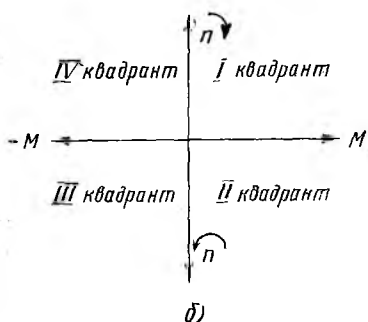
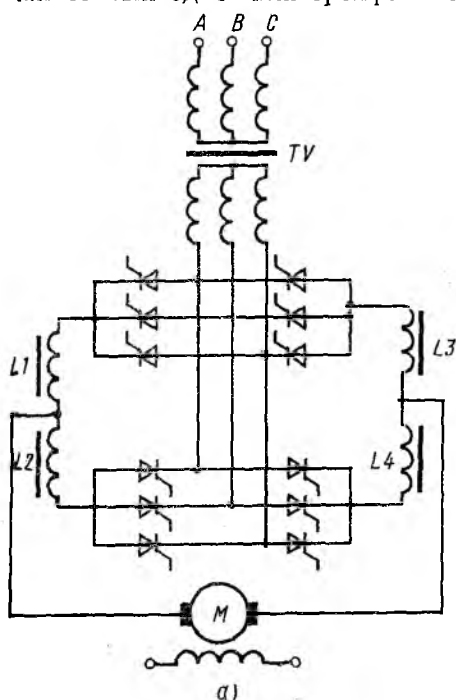


Рис. 20. Реверсивная трехфазная мостовая схема:  
 а — схема; б — квадранты механических характеристик

честве нагрузки выпрямителя использовать двигатель постоянного тока, то мы получим четырехквadrантный привод (рис. 20,б). Это значит, что в *I* и *II* квадрантах машина работает в двигательном и тормозном режимах при положительных значениях момента нагрузки в *III* и *IV* — то же, но при отрицательных значениях момента (например, при подъеме груза привод лебедки нагружен положительным моментом, при спуске — отрицательным).

Если внимательно рассмотреть трехфазную с нулем схему реверсивного электропривода (см. рис. 40,б), мы увидим, что включение одной группы тиристорov (назовем ее анодной, так как аноды тиристорov имеют общую точку) вращает двигатель в одну сторону, включение катодной группы — в противоположную. Существуют различные способы управления обеими группами тиристорov — раздельный и согласованный. Последний может быть линейным и нелинейным.

Сущность раздельного управления состоит в том, что в статических режимах работает только одна группа тиристорov, а в динамических — обе группы, что обеспечивает достаточное быстрое действие системы привода. Недостатками способа являются: наличие прерывистых токов, что ведет к недоиспользованию двигателя по моменту, отсутствие инверторного режима, сравнительно сложная схема логики для разрешения перехода с одной группы на другую.

По соотношению углов отпирания в режимах выпрямления и инвертирования согласованные схемы делят на линейные ( $\alpha + \beta = 180^\circ$ ) и нелинейные ( $\alpha + \beta = 300^\circ$ ). Наилучшими динамическими показателями обладает схема с линейным согласованием, но она требует наличия уравнивающих реакторов. Последние отсутствуют у схем с нелинейным согласованием, но при этом появляется зона нечувствительности при переходе с одного направления вращения на другое. В некоторых случаях это недопустимо.

Остановимся на способах управления тиристорами. Основной задачей управления является обеспечение изменения угла зажигания тиристорov в требуемых пределах. Эти пределы зависят от схемы выпрямления. Для однополупериодной и двухполупериодной схем  $\alpha_{\max} = 180^\circ$ , для трехфазной с нулем  $\alpha_{\max} = 60^\circ$ , для трехфазной мостовой  $\alpha_{\max} = 30^\circ$ .

Наиболее широкое применение получила импульсно-фазовая система управления. В этой системе осуществляется сдвиг управляющих импульсов по фазе относительно напряжения переменного тока, приложенного к аноду и катоду тиристорov. Такие системы состоят из фазосдвигающего устройства, усилителя и формирователя импульсов.

Рассмотрим полупроводниковую систему управления [9], приведенную на рис. 21,а. На вход системы подаются два напряжения; развeртывающее  $U_n$  и управляющее  $U_y$ . Развeртывающее напряжение имеет пилообразный вид и формируется с помощью трех трансформаторов  $TV1$ ,  $TV2$  и  $TV3$ , вторичные напряжения которых суммируются при помощи резисторов  $R1$ ,  $R2$  и диодов  $V1$ ,  $V2$ .

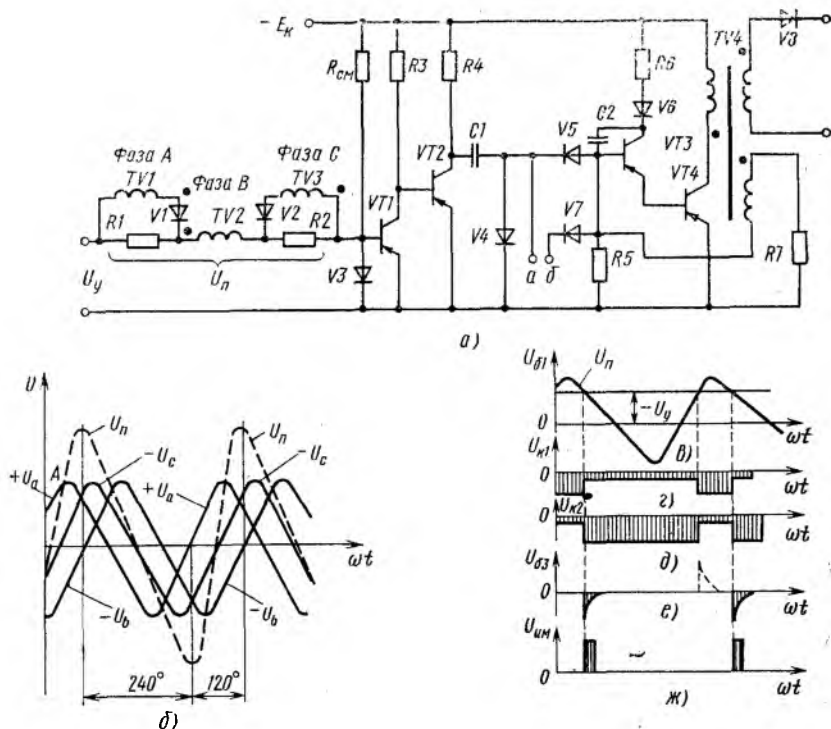


Рис. 21. Полупроводниковая схема управления тиристорами (а), диаграммы напряжений сети и трансформатора (б) и элементов схемы (в—ж)

В результате получается пилообразная кривая напряжения  $U_n$  развертки (рис. 21, б). Продолжительность рабочего участка составляет  $240^\circ$ , нерабочего —  $120^\circ$ . Первичные обмотки трансформаторов  $TV1$ ,  $TV2$ ,  $TV3$  включаются в сеть питания так, чтобы напряжение  $U_n$  пересекало ось времени со сдвигом по фазе на  $90^\circ$  по отношению к точке А естественного открывания тиристора, включенного под напряжение  $+U_a$ .

На пилообразное напряжение  $U_n$  накладывается напряжение управления  $U_y$  и их алгебраическая сумма подается на входы транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , включенных по схеме с общим эмиттером. В момент, когда сумма напряжений  $U_n$  и  $U_y$  будет равна нулю (рис. 21, в), т. е.  $U_y + U_n(\omega t) = 0$ , транзистор  $VT1$  открывается и в его коллекторной цепи проходит ток, имеющий форму прямоугольных импульсов. Снимаемый с коллектора импульс напряжения  $U_{k1}$  (рис. 21, г) подается на базу транзистора  $VT2$ , который усиливает его и изменяет фазу на  $180^\circ$  (рис. 21, д). Сигнал с выхода  $VT2$  после конденсатора  $C1$  имеет импульсную форму или, как говорят, сигнал дифференцируется емкостью. Образующийся при этом положительный импульс не пропускается диодом  $V4$  (рис. 21, е), а отрицательный через диод  $V5$  поступает на базу транзистора  $VT3$  и включает схему ждущего блокинг-генератора,

выполненную на транзисторах  $VT3$ ,  $VT4$  с положительной трансформаторной обратной связью (обмотка  $W2$ ). При подаче на базу транзистора  $VT3$  отрицательного импульса открывается триод  $VT4$ . В первичной обмотке трансформатора  $TV4$  проходит при этом ток, и в сердечнике создается магнитный поток, наводящий в другой обмотке ЭДС, которая поддерживает ток в базе триода  $VT4$  и после окончания импульса на входе блокинг-генератора.

С выходной обмотки трансформатора  $TV4$  снимается управляющий импульс с крутым передним фронтом (рис. 21, ж) и через диод  $V8$  подается на управляющий электрод тиристора. Высокая крутизна фронта выходного импульса обеспечивается большим коэффициентом усиления составного транзистора и положительной обратной связью каскада.

Диапазон изменения фазы управляющего импульса в такой системе составляет  $200\text{--}210^\circ$  (против теоретического в  $240^\circ$ ), так как при больших углах прекращается четкая фиксация момента пересечения опорного напряжения  $U_n$  с напряжением управления  $U_y$ .

Для предотвращения срабатывания блокинг-генератора от коротких ложных импульсов цепь база — коллектор транзистора  $VT3$  шунтируется конденсатором  $C2$ . Для защиты транзисторов  $VT3\text{--}VT4$  от перенапряжений, возникающих на обмотках трансформатора  $TV4$  при снятии импульсов, первичная обмотка его шунтируется разрядной цепочкой  $R6\text{--}V6$ . Для защиты управляющего электрода тиристора от значительных отрицательных напряжений включается диод  $V8$ . Снижение напряжения между коллектором и базой транзистора  $VT1$  при положительном сигнале на базе достигается включением диода  $V3$ , который выравнивает потенциалы базы и эмиттера данного транзистора при  $U_6 > 0$ .

В трехфазной мостовой схеме выпрямления одновременно должны работать два тиристора: один — в анодной, другой — в катодной группах. При этом каждый вентиль одной группы работает поочередно с двумя вентилями другой группы. Для включения тириستоров данной схемы в нужный момент времени рассмотренная полупроводниковая система управления позволяет получать с помощью логической схемы сложения на диодах  $V5$  и  $V7$  два узких отпирающих импульса, сдвинутых на  $60^\circ$  (точки  $a, б$ ). При этом на базу транзистора  $VT3$  через диод  $V5$  поступает импульс с формирователя фазы (транзистор  $VT1$ ) данного блока управления. Сюда же через диод  $V7$  приходит импульс с блока управления, передаваемый тиристором второй группы, работающего в паре с тиристором первой группы, но фаза отпирающего его отстает на  $60^\circ$ . С катода диода  $V5$  уходит импульс на блок управления тиристором второй группы, также работающего в паре с тиристором первой группы, но первоначальный момент отпирающего его опережает на  $60^\circ$  момент отпирающего тиристоры первой группы.

Таким образом, обеспечивается строго одновременная подача импульсов на управляющие электроды одновременно работающих

тиристоры, что необходимо для правильной коммутации вентиля преобразователя в области прерывистых токов. Для управления многофазным выпрямителем полупроводниковая система управления должна иметь столько таких каналов, сколько фаз выпрямления содержит преобразователь [9].

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Промышленностью выпускаются различные типы вентиля и тиристоры. Имеются нелавинные вентили (серия В), тиристоры (серии Т) и лавинные приборы (серии ВЛ и ТЛ). Последние серии вентиля и тиристоры имеют лавинные обратные характеристики, т. е. вольтамперная характеристика в непроводящем направлении обладает крутым изгибом. Такие приборы как бы защищаются от кратковременных обратных перенапряжений. Лавинные вентили и тиристоры, как правило, не требуют установки в выпрямителях защитных РС-цепей.

Выпускаются несколько серий быстродействующих тиристоры, которые применяют в преобразователях частоты. Эти тиристоры могут работать с частотой до 10 кГц и выше. Высокочастотные тиристоры серии ТЧ рассчитаны на номинальные токи 10—125 А и напряжения 100—1000 В; быстродействующие тиристоры серии ТБ — на номинальные токи 160—400 А и напряжения 300—1200 В; тиристоры динамические серии ТД — на номинальные токи 20—500 А и напряжения 100—1600 В. Кроме того, выпускают высокочастотные вентили серии ВЧ — на номинальные токи 100—200 А и напряжения 50—1000 В.

Оптронные тиристоры обеспечивают гальваническую развязку между силовой схемой и цепями управления благодаря встроенной оптоэлектронной паре. Применение оптронных тиристоры позволяет упростить конструкцию, снизить размеры и массу преобразователя за счет исключения из цепей управления разделительных трансформаторов или оптоэлектронных приборов. Выпускают тиристоры серий ТО и ТО2, рассчитанные на номинальные токи 6,3; 10—40 А; на номинальное напряжение 100—1000 В и частоту до 500 Гц.

В цепях переменного тока для различных регуляторов напряжения и для реверсивных выпрямителей целесообразно применение двунаправленных, проводящих в обоих направлениях тиристоры, которые получили название симметричных (симисторы). Симметричные тиристоры серии ТС служат для работы на частоте до 500 Гц с номинальными токами 80—160 А и напряжением 50—900 В. Симисторы серии ТС14 выпускают на номинальные токи 100—250 А, напряжения 200—1200 В, и они могут работать на частотах до 2000 Гц. Имеются маломощные симисторы ТС10, рассчитанные на ток 10 А и частоту 50 Гц.

В преобразователях частоты и в ряде других схем используется встречно-параллельное соединение тиристоры и диодов, например, тиристор инвертора и диод (вентиль) обратного моста. Разработан и применяется в модифицированной серии частотно-регулируемых электроприводов ЭКТ2 новый прибор тиристор-диод, который в схеме инвертора заменяет два отдельных прибора; тиристор и диод. Он представляет собой общую полупроводниковую структуру. Совмещенный тиристор-диод имеет лучшие динамические свойства, меньшие массу и размеры, чем отдельные приборы — тиристор и диод.

Перспективными приборами являются запираемые тиристоры, которые можно закрыть не дожидаясь уменьшения до нуля силового напряжения и тока анод—катод. Запирание этих тиристоры достигается подачей в требуемый момент времени на управляющий электрод отрицательного импульса. Это свойство особенно ценно для преобразователей частоты и широтно-импульсных преобразователей (прерывателей) в цепях постоянного тока. Запираемые тиристоры позволяют исключить коммутирующие цепочки из указанных выше схем.

## ОХЛАЖДЕНИЕ ВЕНТИЛЕЙ

Охлаждение силовых вентиля производятся для отвода теплоты в процессе их работы. Оно бывает воздушным и жидкостным (в качестве жидкости — вода



или масло). При воздушном охлаждении применяют конструкции охладителей в виде пластин (для вентилях на ток 10—25 А) и специальные охладители, имеющие массивное основание с резьбовым отверстием под винт на аноде или катоде и перпендикулярно к основанию расположенные ребра (на вентили для тока 50—320 А).

Воздушное охлаждение может быть естественное и принудительное. При естественном охлаждении теплоотдача не превышает 10 Вт на 1 м<sup>2</sup> поверхности охладителя на каждый градус нагрева. Вследствие этого токовая нагрузка на вентиль не превышает 20—30% от номинальной. Принудительное воздушное охлаждение осуществляется при помощи вентиляторов. Для преобразователей больших мощностей применяется водяное охлаждение, обеспечивающее теплоотдачу до 650 Вт на 1 м<sup>2</sup> при нагреве на 1°C.

## ЗАЩИТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

При эксплуатации преобразователей возникают как технологические токовые перегрузки, так и аварийные режимы, нередко сопровождаемые токами короткого замыкания. Кроме того, переходные процессы в силовых цепях преобразователей сопровождаются всплеском напряжения на вентилеях. Защита преобразователей должна быть быстродействующей, в противном случае кремниевые элементы: диоды, транзисторы и тиристоры при токовой перегрузке и перенапряжении выйдут из строя раньше, чем сработает защита. Для правильного выбора системы токовой защиты необходимо знать перегрузочную способность вентилях, допустимый в течение 10 мс ударный ток и тепловой эквивалент, характеризующий допустимую аварийную перегрузку по нагреву. Эти данные имеются в паспортах на каждый полупроводниковый элемент.

Перегрузочные характеристики диодов типа ВК2-200 и тиристоров ТЛ-150 при скорости потока охлаждающего воздуха 12 м/с и температуре окружающей среды 40°C показывают, что диод и тиристор в течение 1 с выдерживают перегрузку по току, равную 100% номинальной. Зато в течение 0,02 с диод выдерживает 7-кратную перегрузку, а тиристор — почти 6-кратную. Для защиты от токов короткого замыкания следует применять только быстродействующие предохранители типов ПНБ и ПБВ. Они имеют закрытый фарфоровый патрон (ПНБ) или герметический керамический корпус (ПБВ), заполняемые чистым песком. Сама плавкая вставка изготавливается из серебряной ленты. Время срабатывания составляет 10—15 мс. Номинальный ток плавкой вставки следует выбирать так, чтобы значение  $I_{\text{п}}^2 t$ , необходимое для срабатывания предохранителя, было меньше значения  $I_{\text{д}}^2 t$  защищаемого вентиля, где  $I_{\text{п}}$  и  $I_{\text{д}}$  — значение тока предохранителя и допустимое значение тока перегрузки вентиля;  $t$  — время. Надо иметь в виду, что предохранители, выбранные из этих условий, защищают только от токов короткого замыкания, а не от длительных перегрузок.

Приводим основные технические данные быстродействующих предохранителей. Предохранители типа ПНБ-5 рассчитаны для работы в цепях с напряжением до 660 В постоянного тока и выпускаются на номинальные токи от 40 до 630 А. Предохранители выпускают с визуальным указателем и блок-контактом для быстрого обнаружения сгоревшего предохранителя.

Предохранители серии ПБВ предназначаются для работы в цепях переменного тока напряжением 380 В. Их выпускают в трех модификациях: ПБВ-1 — на токи от 160 до 630 А с жидкостным охлаждением, для установки на шины; ПБВ-2 — на те же токи, но с воздушным охлаждением, для установки на радиатор; ПБВ-3 — на токи от 63 до 250 А без охлаждения, с установкой на контактных стойках.

Для защиты от токовых перегрузок применяют автоматические выключатели-автоматы, которые имеют замыкающие главные контакты и расцепители. Последние служат для автоматического отключения сетевого напряжения при превышении током заданного значения. Автоматы выпускают с электромагнитными, тепловыми и комбинированными расцепителями. Электромагнитный расцепитель защищает от коротких замыканий, тепловой — от длительных перегрузок.

При срабатывании теплового расцепителя повторное включение автомата можно осуществить не ранее чем через 1—1,5 мин — время, необходимое для остывания тепловых элементов. Так как быстродействие автоматов хуже, чем быстродействие предохранителей, их используют как резервные средства защиты, обеспечивающие отключение преобразователей в случае отказа предохранителей.

Автоматы выпускают для работы в цепях переменного и постоянного токов. Автоматы переменного тока устанавливают в цепи переменного тока преобразователя, автоматы постоянного тока включаются на выходе преобразователя. Автоматы выбирают следующим образом: номинальный ток автомата должен быть не меньше действующего значения тока защищаемой цепи, а ток срабатывания расцепителя не должен превышать допустимого значения тока, проходящего через вентиль, с учетом кратковременной перегрузки.

В преобразователях применяют автоматы серий АП-50-3М, АК50-3М и АЗ100, рассчитанные на напряжение 380—500 В переменного тока и 220 В постоянного тока. Время срабатывания составляет 0,015—0,017 с. Освоена также серия автоматов АЗ700, рассчитанная на напряжение переменного тока до 600 В и постоянного — до 400 В. Время отключения 10—15 мс.

Для защиты от перенапряжений, возникающих между катодом и анодом тиристора в момент запираания вентилей, применяют демпфирующие *RC*-цепи, состоящие из последовательно соединенных конденсаторов *C* и резисторов *R* и включенные параллельно аноду-катоде вентиля. На время заряда конденсатора тиристор как бы шунтируется резистором, что приводит к уменьшению перенапряжений. Емкость конденсаторов выбирается в пределах 0,25—2 МкФ и сопротивление резисторов  $R=5\div 40$  Ом.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Выше мы рассмотрели составные части электропривода: двигатели и преобразователи. Переходим к третьей, не менее важной части электропривода, системе управления и регулирования. Под управлением подразумевается способ изменения требуемого уровня частоты вращения. В подавляющем большинстве случаев это достигается обычным потенциометром, который при повороте ползунка меняет задающее напряжение от 0 до  $\pm 10$  В. Знаки  $\pm$  определяют направление вращения по или против часовой стрелки. В неререверсивных приводах задающее напряжение имеет только один знак. Кроме ручного задания частоты вращения с помощью потенциометра, ее можно задавать напряжением, путем поворота сельсина, вращения тахогенератора, управления преобразователем импульсов напряжения и т. д. Поворот якоря тахогенератора может производиться каким-либо органом станка.

В число управляющих команд входят изменение уровня частоты вращения, пуск, реверс, торможение, регулировка и другие действия. Но есть еще воздействия на работу привода, которые происходят без вмешательства человека. Они предназначены для обеспечения жесткости механических характеристик; достижения максимального быстродействия; обеспечения разного рода защит; позиционирования вала двигателя; следящего режима электропривода; обеспечения широкого диапазона регулирования; обеспечения минимальной погрешности частоты вращения при изменении температуры, колебании сети и других факторах; организации

двухзонного регулирования (переход из зоны регулирования напряжением в зону регулирования током возбуждения); перехода из одного квадранта механической характеристики в другой.

Электропривод обеспечивает указанные свойства благодаря использованию различных систем автоматического регулирования. Остановимся на общих вопросах автоматического регулирования, без которого не обходится ни одно современное устройство. Рассмотрим автоматическое регулирование в системе электропривода. Например, в электроприводе имеется автоматическая система регулирования частоты вращения, которая обеспечивает малую зависимость частоты вращения от нагрузки в широком диапазоне. Если мы к двигателю приложим постоянное напряжение, которое не будет меняться, то при росте нагрузки частота вращения начнет падать. Можно сопоставить это с движением автомобиля. Если после прямой дороги перейти на подъем, не увеличивая нажатия педали газа, автомобиль вскоре остановится. Чтобы этого не произошло, вы должны прибавить газ, т. е. увеличить подачу энергии в двигатель. Но эта прибавка производится путем нажатия на педаль. В электроприводе «нажать педаль» при росте нагрузки некому, он сам (автоматически) должен увеличить напряжение на двигателе, чтобы поддержать частоту вращения на заданном уровне. При этом, если прибавлять или убавлять энергию большими порциями, скорость будет периодически изменяться (режим автоколебаний), малые порции могут привести к недопустимому падению или увеличению частоты вращения. Правильно организованная система автоматического регулирования дозирует поток энергии так, чтобы сохранить частоту вращения на заданном уровне. Чтобы понять, как работает система автоматического регулирования (САР), необходимо остановиться на так называемой обратной связи, без которой нельзя реализовать автоматическое регулирование.

Начнем с того, что САР, имеющая обратную связь, называется замкнутой. Имеются разомкнутые системы, т. е. устройства без обратной связи. В области электропривода таким является дискретный электропривод, который в силу своего устройства может работать без обратной связи. Но при этом он может «ошибаться», т. е. не всегда точно выполнить требуемую команду.

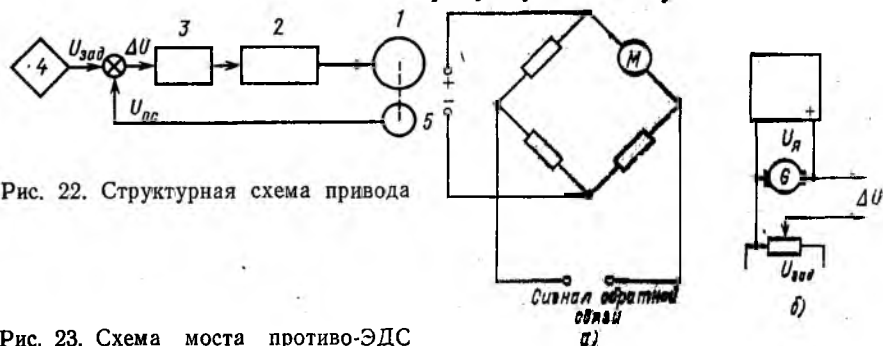


Рис. 22. Структурная схема привода

Рис. 23. Схема моста против-ЭДС

В современном приводе встречаются обратные связи по току, частоте вращения, напряжению, противо-ЭДС и другим параметрам. Рассмотрим работу главной из них — обратной связи по частоте вращения. На рис. 22 показана структурная схема любой серии электропривода постоянного тока. Она состоит из двигателя 1, блока регуляторов 3, силового преобразователя 2, датчика обратной связи 5, источника задающего напряжения 4.

Работа САР состоит в следующем: пусть ненагруженный двигатель вращается на каком-то уровне частоты вращения. Этому режиму соответствует на входе усилителя сигнал  $\Delta U$ , определяющий напряжение на якоре двигателя, а следовательно, и частоту вращения. Сигнал  $\Delta U$  является разностью задающего сигнала и сигнала датчика обратной связи и называется сигналом рассогласования  $\Delta U = U_{\text{зад}} - U_{\text{ос}}$ .

Рассмотрим поведение системы, когда к двигателю прикладывается нагрузка. В первый момент частота вращения упадет, так как прикладываемая к двигателю «порция» энергии уже не может обеспечить его работу на той же частоте при наличии нагрузки. И вот тут вступает в действие обратная связь. Так как частота вращения упала, сигнал датчика обратной связи уменьшился. Разность  $\Delta U$  между неизменным  $U_{\text{зад}}$  и  $U_{\text{ос}}$  увеличилась (новое значение  $\Delta U_1$  стало больше  $\Delta U$ ), следовательно, напряжение на якоре автоматически прибавилось. В результате упавшая частота вращения вновь увеличилась. Таким образом благодаря обратной связи частота вращения практически перестала зависеть от нагрузки. Цель достигнута — привод обеспечивает жесткие механические характеристики.

В качестве датчика обратной связи чаще применяют тахогенератор, представляющий собой электрическую машину, работающую в генераторном режиме. Как известно, напряжение такой машины прямо пропорционально частоте ее вращения. Тахогенератор, как правило, находится на валу якоря двигателя. Бывают случаи, когда он приводится во вращение через ремень или зубчатую передачу.

Для диапазонов регулирования до 1:50 применять тахогенератор неэкономично. В этих случаях его заменяют эквивалентными электрическими схемами: мостом противо-ЭДС (рис. 23, а) или обратной связью по напряжению (рис. 23, б). Эти способы применены в приводах серий ПМУ, ЭТ1Е и др. Тут вместо тахогенератора применяют электрические схемы, формирующие напряжение, приблизительно пропорционально частоте вращения.

Вернемся к принципу обратной связи. Она может быть положительной или отрицательной. В рассмотренном примере обратная связь отрицательная (знак минус при  $U_{\text{ос}}$ ), так как при отсутствии задающего сигнала сигнал обратной связи не увеличивает, а уменьшает напряжение на якоре двигателя. Если неправильно соединить выводы тахогенератора, обратная связь может стать положительной. Признаком этого является выход двигателя на уровень максимальной, нерегулируемой скорости.

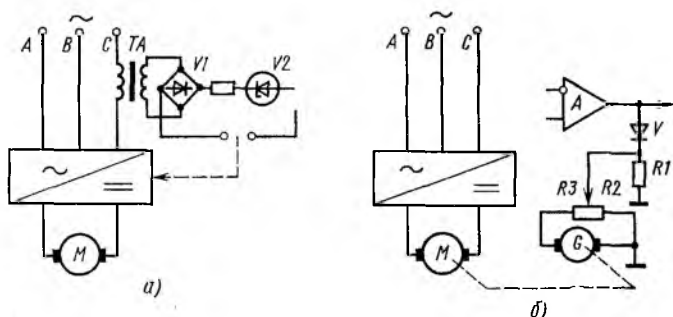


Рис. 25. Схемы токоограничения с трансформатором тока (а) и упреждающим токоограничением (б)

Для предотвращения выхода из строя двигателя в схеме привода предусматривают цепи тока ограничения, работающие автоматически. Типовая схема токоограничения представлена на рис. 25, а. Датчиком обратной связи по току является трансформатор тока, включенный через первичную обмотку в одну из фаз сетевого напряжения (ток в фазе растет с ростом тока якоря). Вторичная обмотка работает на выпрямитель  $V1$ , на выходе которого имеется стабилитрон  $V2$ . При пике тока стабилитрон «пробивается», а образованное при этом напряжение запирает усилитель. В результате напряжение и ток в цепи якоря резко уменьшаются.

Есть еще одна схема — схема с упреждающим токоограничением (рис. 25, б). Цель токоограничения содержит резисторы  $R1$ — $R3$  и диод  $V$ . Резисторы  $R2$  и  $R3$  образуют делитель напряжения тахогенератора  $G$ . Напряжение на  $R1$  является опорным.

Работа схемы происходит следующим образом: если выходное напряжение операционного усилителя (ОУ) меньше опорного, тогда — токоограничения нет. Если ток в цепи якоря превышает допустимое значение, выходное напряжение  $A$  превышает опорное, диод  $V$  «пробивается». При этом выход  $A$  шунтируется цепью  $V$ ,  $R1$ , что уменьшает выходное напряжение  $A$  и вместе с тем предотвращает недопустимое увеличение тока в цепи якоря двигателя. Остается объяснить необходимость изменения опорного напряжения в зависимости от частоты вращения двигателя. Так как выходное напряжение  $A$  тем больше, чем больше частота вращения, то при неизменном значении опорного напряжения токоограничение было бы неодинаково — с ростом частоты вращения кратность допустимого тока относительно номинального уменьшалась. С целью сохранения кратности токов на заданном уровне необходимо, чтобы опорное напряжение росло с ростом частоты вращения и наоборот, что достигается включением делителей  $R2$ ,  $R3$  в цепь напряжения тахогенератора.

Теперь перейдем к важнейшему понятию — структурной схеме. Она существенно отличается от принципиальной электросхемы. Отличие состоит не в электрическом, а в функциональном содержании узлов САП привода. Структурная схема отражает назначе-

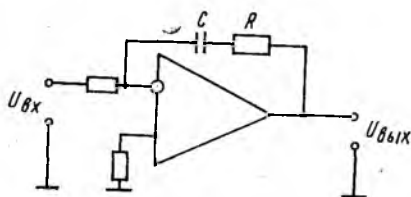


Рис. 24. Схема корректирующей цепи

Основным назначением усилительного блока является усиление сигнала рассогласования  $\Delta U$ . Попробуем разобраться, для чего это нужно. Очевидно, что коэффициентом усиления определяется чувствительность системы или быстрота ее реакции на изменение условий работы. Если коэффициент усиления мал, то при

росте нагрузки прибавка энергии недостаточна и частота вращения увеличивается мало, т. е. характеристики привода будут нежесткими. Наоборот, при излишне большом коэффициенте усиления добавка энергии будет избыточна и привод станет неустойчивым. Как же добиться одновременно хорошей жесткости привода и его устойчивости? Тут необходимо перейти к понятию коррекции, которое имеется в каждом современном приводе. Возникновение автоколебаний потребует их ликвидации за счет уменьшения коэффициента усиления ( $K_n$ ). Но это приведет к нежесткости характеристик привода. Выходом из этого является повышение  $K_n$  до достижения режима автоколебаний и затем устранение их с помощью корректирующих цепей.

На рис. 24 показана наиболее распространенная электрическая схема цепи коррекции. Как видно из рисунка, параллельно усилителю включена  $RC$ -цепь. При определенных значениях  $R$  и  $C$  (обычно  $R=20 \div 300$  кОм, а  $C=0,1 \div 1$  мкФ) автоколебания пропадают. Чем же это объяснить? Оказывается, здесь тоже имеется отрицательная обратная связь. Если раньше она действовала по постоянной составляющей сигнала, то теперь воздействие выходного сигнала усилителя на входной происходит по переменной составляющей (автоколебательный сигнал по форме напоминает синусоиду напряжения с частотой 5—20 колебаний в секунду). Физическая картина подавления автоколебаний состоит в подаче с выхода на вход усилителя встречного напряжения, которое имеет противоположный по фазе знак. Можно провести аналогию с колебаниями маятника. Чтобы его остановить, надо, как говорят, в противофазе создать встречные колебания.

Из изложенного видно, что обратная связь обеспечивает жесткие механические характеристики привода, его устойчивость и т. д. Но есть еще одно применение обратной связи — обеспечение токоограничения. При пуске, реверсе, торможении, перегрузке величина тока в цепи якоря может достигнуть недопустимой величины, превышающей номинальное его значение в 10 и более раз. Пусть в момент пуска к двигателю прилагается напряжение 110 В, а сопротивление якоря 1—2 Ома. По закону Ома  $I_{\text{пуск}} = 110/2 = 55$  А, а номинальный ток двигателя равен 5 А. Таким образом, пусковой ток превышает номинальный в  $55/5 = 11$  раз. Это значение тока, несмотря на то, что он длится доли секунды, может вывести из строя коллектор двигателя.

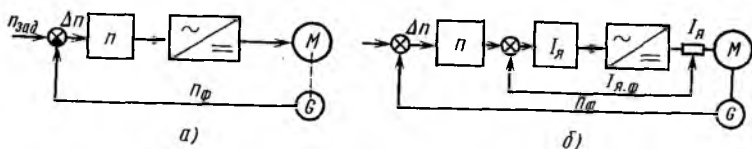


Рис. 26. Одноконтурная (а) и двухконтурная (б) схемы автоматического регулирования

ние (функцию) каждого узла схемы. Примером простейшей структурной схемы является схема на рис. 22. Каждый «квадратик» схемы имеет четкие функциональные параметры. Назначение двигателя — превращение электрической энергии в механическую, преобразователь превращает переменный ток в постоянный или в переменный с регулируемым напряжением и частотой, усилитель усиливает сигнал рассогласования и т. д. В любой системе электропривода имеется двигатель, преобразователь, источник задающего напряжения, датчик обратной связи и регулятор. Последний в зависимости от требований к качеству привода имеет различную структуру, а следовательно, и устройство. Регулятор решает следующие задачи: усиливает сигнал рассогласования, формирует закон регулирования, обеспечивает устойчивость частоты вращения, требуемые статические и динамические характеристики, а также защиту от перегрузки. В основе устройства любого регулятора лежит ОУ, т. е. усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления по напряжению 10 000—1 000 000, большим входным и малым выходным сопротивлениями. ОУ имеет два входа — прямой (+) и инверсный (—). Если входной сигнал подан на прямой вход — выходной сигнал знака не меняет, при подаче на инверсный вход выходной сигнал имеет обратный знак. ОУ является реверсивным усилителем — его выходное напряжение может быть положительно или отрицательно в зависимости от знака входного напряжения. При использовании ОУ в качестве регулятора на его входе происходит сравнение сигналов задания и фактического значения регулируемой величины.

Широкое применение получили так называемые подчиненные САР. Подчиненность их заключается в том, что выходное напряжение предыдущего регулятора является задающим для последующего регулятора. В системах электропривода применяют одноконтурную САР (рис. 26, а) или двухконтурную с подчиненным регулированием частоты вращения и тока (рис. 26, б). В одноконтурной системе привода (например, в серии ЭТЗИ) сигнал рассогласования, являющийся разностью между задающим сигналом и сигналом обратной связи по частоте вращения, усиливается и в таком виде подается в блок управления углом зажигания тиристоров. Для обеспечения устойчивости усилитель охвачен RC-цепью.

В двухконтурной системе появляется еще один усилитель с обратной связью по току. Теперь схема состоит не из одного, а из двух регуляторов: частоты вращения и тока. При этом выходное напряжение регулятора частоты вращения является задающим на-

пряжением для регулятора тока. Благодаря этому мы получаем наряду с регулированием частоты вращения одновременно ограничение тока в цепи якоря в требуемых пределах. Оба регулятора охвачены *РС*-цепями для обеспечения устойчивости и придания переходным процессам желаемой формы. В качестве датчика тока служат либо шунт в цепи тока якоря, либо трансформатор тока.

### ТИПОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Теперь можно перейти к различным режимам работы привода. К ним можно отнести двигательный режим и режим торможения. Например, при подъеме груза привод работает в двигательном режиме, при спуске — в режиме торможения. В теории электропривода анализируются работа двигателя при разных знаках момента нагрузки и направления вращения. Для этого используются координаты механических характеристик (см. рис. 20,б), выражающих зависимость частоты вращения от момента, развиваемого двигателем.

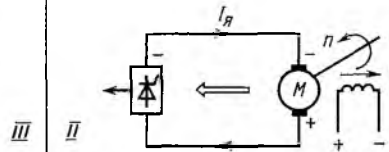
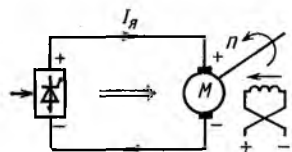
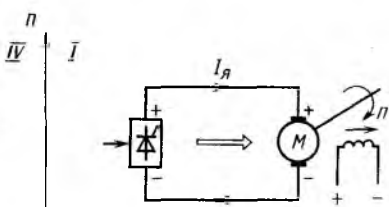
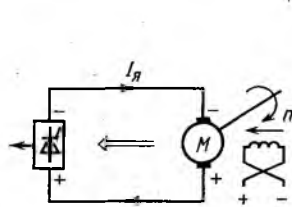
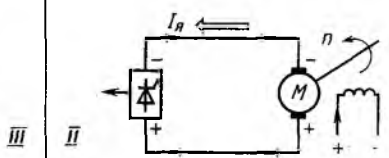
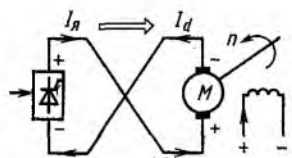
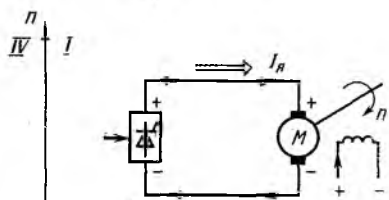
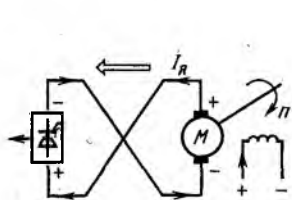
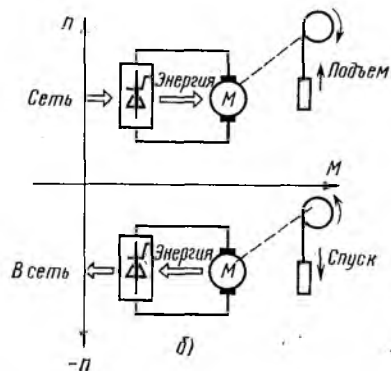
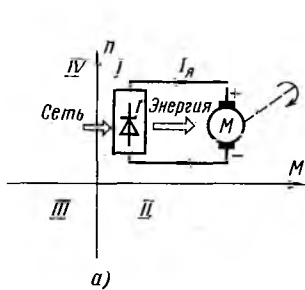
На рис. 27 показаны возможные режимы работы двигателя в зависимости от типа преобразователя и фазы нагрузки. На рис. 27, а в первом квадранте показан тиристорный преобразователь, питающий двигатель постоянного тока. Двигатель имеет, например, вращение по часовой стрелке, энергия идет от преобразователя к двигателю, преобразователь работает в выпрямительном режиме, двигатель *М* работает в двигательном режиме, энергия берется из сети и через преобразователь поступает в двигатель. Ясно, что аналогично привод будет работать в *III* квадранте, но вращаться двигатель будет против часовой стрелки.

На рис. 27,б показан двухквадрантный привод, где преобразователь непереворачиваемый. В этом случае в *I* квадранте привод будет работать точно так же, как и в первом случае, а во *II* (тормозном) квадранте (после контактного реверса преобразователя в режиме спуска груза) источником энергии является груз, вращающий двигатель, и поэтому энергия может возвращаться в сеть.

На рис. 27,в показан непереворачиваемый четырехквадрантный привод. В *I* и *II* квадрантах происходят те же явления, что и в двухквадрантном приводе. Если же сделать переключение в цепи якоря так, как показано в левой части рисунка, мы попадем в *III* и *IV* квадранты. При этом тормозной режим соответствует *IV* квадранту, двигательный — *III*. Рекуперация энергии происходит в *IV* квадранте, где двигатель имеет правое вращение, а потребление энергии из сети происходит в *III* квадранте, где двигатель имеет левое вращение. Таких же результатов можно достичь путем реверса тока возбуждения (см. *III* и *IV* квадранты, рис. 27,г).

До сих пор мы рассматривали непереворачиваемый тиристорный преобразователь, характерной особенностью которого является наличие одной группы тиристоров. Четырехквадрантный привод для станков с ЧПУ имеет две группы тиристоров. При работе одной группы двигатель имеет левое вращение, при работе другой — правое. На рис. 27,д показана работа привода в четных квадрантах





2)

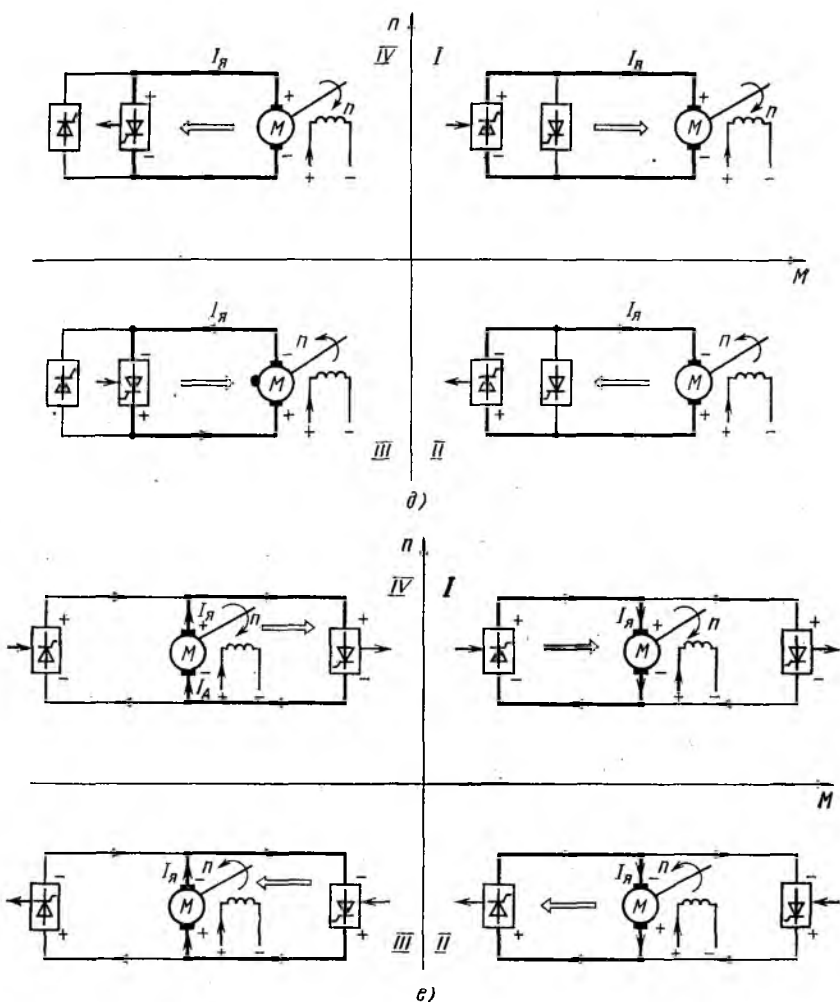


Рис. 27. Работа электропривода в четырех квадрантах механических характеристик:

*а* — одноквадрантный привод; *б* — двухквадрантный привод; *в* — четырехквадрантный привод; *г* — четырехквадрантный привод с реверсом в цепи возбуждения с одной группой тиристоров; *д* — четырехквадрантный реверсивный привод с двумя группами тиристоров с раздельным управлением; *е* — четырехквадрантный реверсивный привод с двумя группами тиристоров с согласованным управлением

механических характеристик. Двигательный режим имеет место в I и III квадрантах, тормозной — во II и IV. Одна группа тиристоров работает в I и II квадрантах, другая — в III и IV. Направление вращения двигателя, знак момента, направление энергии показано стрелками. В данном случае применяется схема раздельного управления группами тиристоров, т. е. одновременно обе группы работать не могут. Однако до сих пор встречаются схемы

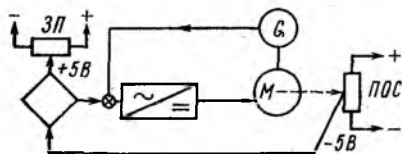


Рис. 28. Схема электропривода для работы в режиме позиционирования

согласованного управления (рис. 27, е). Из рисунка видно, что для данной системы привода характерен инверторный режим работы во всех четырех квадрантах механических характеристик. Это значит, что если одна группа работает в выпрямительном режиме, другая отдает (инвертирует) энергию обратно в сеть.

Остановимся на других режимах работы электропривода. Среди них в первую очередь следует остановиться на режимах позиционирования и слежения. Например, для автоматизации процесса сверления печатных плат создан электропривод, отличительной особенностью которого является датчик положения на валу двигателя. Благодаря этому датчику обычный электропривод получает новое качество — он может точно отрабатывать заданный угол поворота вала двигателя. В зависимости от вида датчика точность угла поворота изменяется от  $1^\circ$  до  $1'$ . Как же работает такой привод? Как дается сигнал на остановку двигателя при достижении его валом заданного угла поворота?

Вспомним, что остановке двигателя соответствует нулевое значение задающего напряжения. Эта задача решается путем установки на конце вала (рис. 28) потенциометра обратной связи (ПОС). Если задающий потенциометр (ЗП) повернуть на какой-то угол, на входе привода появится сигнал, например 5 В, и двигатель начнет вращаться. Одновременно начнет вращаться ПОС. Как только он выдаст те же 5 В, напряжение на входе преобразователя (сигнал рассогласования  $\Delta U$ ) станет равным нулю и привод автоматически остановится. Ясно, что если задать при помощи ЗП напряжение 7 В — угол поворота увеличится, если задать 2 В — уменьшится. Для достижения высокой точности отработки заданного угла вместо потенциометров применяют фотоимпульсные и другие конструкции датчиков. Но принцип действия остается тем же. Если такому приводу задать программу, состоящую из серии координатных отрезков, соответствующих расстоянию между отверстиями печатной платы, станет ясной работа электропривода в режиме позиционирования. Он устанавливает плату относительно сверла так, чтобы просверлить отверстие в нужном месте. После окончания сверления плата вновь перемещается, вновь происходит сверление и т. д. Так как отверстия могут располагаться в любом месте печатной платы, то одновременно работают два привода. Один смещает плату, например, по оси X, другой — по оси Y.

В режиме позиционирования задающий потенциометр поворачивается на определенный угол и останавливается. В следящем режиме он не останавливается, а вращается по заданному закону,

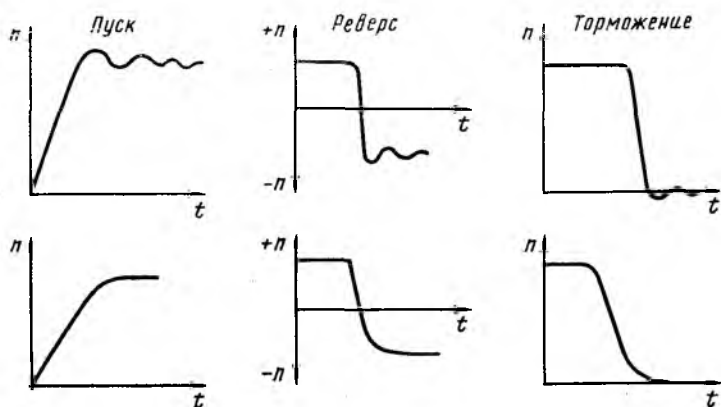


Рис. 29. Переходные процессы в работе электропривода

например, в соответствии с программой устройства ЧПУ. В результате вал двигателя «повторяет» или «следит» за поворотом ЗП. Таким образом, в следящем режиме имеет место отставание движения двигателя от командного перемещения задающего органа. Это отставание называется скоростной ошибкой. Скоростной она называется потому, что с ростом задаваемой частоты вращения она увеличивается и наоборот. Так как наличие скоростной ошибки приводит к ухудшению качества и точности обработки, разработаны способы компенсации скоростной ошибки. Один из них рассмотрен ниже при описании электропривода нового поколения серии ЭТА.

Качество системы автоматического регулирования определяется ее динамическими характеристиками. К ним следует отнести время пуска, торможения и реверса и характер переходного процесса. На рис. 29 показаны возможные формы переходных процессов при пуске, реверсе и торможении. Кривая изменения скорости может быть колебательной (верхний ряд) и аperiodической. Колебательность оценивается числом колебаний до перехода скорости в установившееся состояние. Влияние на форму переходного процесса оказывают параметры коррекции, степень обратной связи по скорости и настройка узла токоограничения. Изменяя параметры цепи коррекции, резистора в цепи обратной связи по скорости и кратность пусковых токов относительно номинального, можно получить различные формы кривых переходных процессов.

Рассмотрим процессы пуска, реверса и торможения в замкнутой по скорости четырехквadrантной системе автоматического регулирования приводом. В первый момент пуска двигатель стоит, а на вход усилителя подается задающее напряжение. Так как напряжение тахогенератора при этом равно нулю, усилитель полностью открывается и к якору двигателя прикладывается максимальное напряжение. Он разгоняется, частота вращения тут же начинает падать — вступил в работу тахогенератор. После достиже-

ния примерного равенства напряжений устанавливается частота вращения, соответствующая ее заданному уровню.

Допустим, нам надо поменять направление вращения на обратное. Для этого необходимо поменять знак задающего напряжения. Это вызывает включение той группы тиристоров, которая вращает двигатель в обратном направлении. Так как тахогенератор некоторое время еще вращается в прежнем направлении, напряжения задания и тахогенератора в первый момент не вычитаются, а складываются. Благодаря этому, происходит быстрое изменение знака выходного напряжения усилителя. После перехода скорости через нуль начинается пусковой процесс, описанный выше. Для быстрого торможения вращающегося двигателя достаточно отключить задающее напряжение, при этом включение тормозящей группы тиристоров осуществляется напряжением тахогенератора. Оно включает ту группу тиристоров, которая вращает двигатель в противоположную сторону. В результате происходит эффективное торможение до момента остановки двигателя, при котором напряжение тахогенератора принимает нулевое значение.

## **РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ СЕРИЙ**

Представляет интерес классификация промышленных электроприводов [11]. Они бывают с машинными преобразователями (системы Г-Д, ЭМУ-Д); со статическими преобразователями (на основе магнитных усилителей, тиристоров и транзисторов). По виду основных обратных связей можно выделить три основных типа приводов с обратной связью: по ЭДС, напряжению (току) и частоте вращения. Первые два типа, имеющие сравнительно малую точность поддержания частоты вращения и невысокие динамические показатели, как правило, применяют при ограниченных диапазонах регулирования (20—50). Обратная связь по выходному параметру обеспечивает наилучшие характеристики, хотя и требует использования датчика частоты вращения, в качестве которого чаще применяется тахогенератор постоянного тока.

По структуре системы автоматического регулирования частоты вращения приводы могут быть одноконтурными, с одной обратной связью по частоте вращения (ЭДС) и многоконтурными, которые могут быть построены или по принципу подчиненного регулирования, когда замкнутые внутренние контуры являются звеньями последующих контуров, или по принципу введения параллельных обратных связей по напряжению, току, ускорению и др.

Ниже рассмотрены серии электроприводов, установленные на эксплуатируемых станках. Из 20 серий промышленных электроприводов, выпущенных электропромышленностью за последние 30 лет, 80% составляют приводы подачи металлорежущих станков, остальные — приводы главного движения.

Для облегчения изучения электроприводов промышленных серий на рис. 30 приведены их схемы. На рис. 30, а показана схема

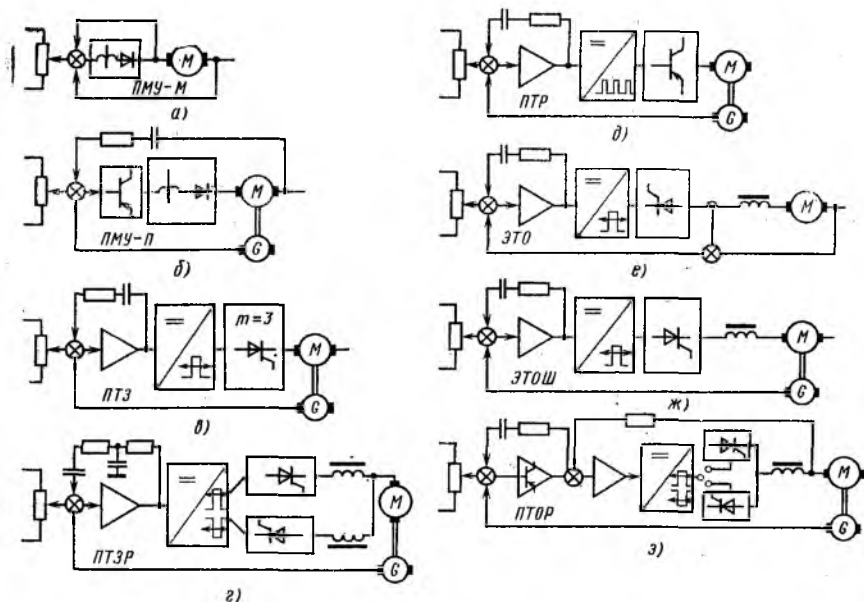


Рис. 30. Структурные схемы электроприводов

привода серии ПМУ-М, состоящая из потенциометрического датчика скорости, магнитного усилителя с выпрямителем и двигателя. Каналы обратной связи соединяют выход магнитного усилителя с его входом (обратная связь по напряжению) и якорь двигателя со входом магнитного усилителя (обратная связь по току). На рис. 30,б приведена схема электропривода серии ПМУ-П, отличающаяся от предыдущей наличием промежуточного транзисторного усилителя и обратной связью по скорости. На рис. 30,в дана схема неререверсивного, а на рис. 30,г — реверсивного тиристорного электропривода серий ПТЗ и ПТЗР. Транзисторный привод серии ПТР представлен на рис. 30,д. Однофазные тиристорные приводы серий ЭТО и ЭТОШ показаны на рис. 30,е,ж, реверсивный привод серии ПТОР — на рис. 30,з.

В качестве исполнительных двигателей применяют электродвигатели постоянного тока серий П, 2П, ПБС, ПС, ПБСТ, ПСТ, ПГТ, ЭП, СЛ, ДК1, ПБВ и др. Ниже приведены описания серий приводов в порядке времени их разработки.

### СИСТЕМА МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ—ДВИГАТЕЛЬ

В основе этой системы привода находится регулируемый преобразователь переменного тока в постоянный. Одним из широкоизвестных способов получения регулируемого напряжения постоянного тока является сочетание неуправляемых диодов — селеновых выпрямителей с магнитными усилителями. Последние обеспе-

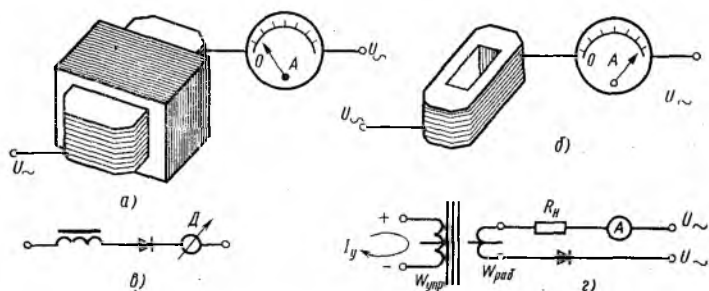


Рис. 31. Принцип действия магнитного усилителя

чивали изменение выпрямленного напряжения в широких пределах. С этой целью в цепи диодных выпрямителей включаются катушки с железным сердечником.

Рассмотрим последовательно, как работает такая цепь. Вспомним, что катушка с железным сердечником (рис. 31, а), включенная в цепь переменного тока, имеет большое индуктивное сопротивление. Это связано с тем, что возникающее при прохождении тока переменное магнитное поле наводит в катушке токи, направленные навстречу основному току (вспомните закон электромагнитной индукции). Результирующий ток становится малым, что равносильно включению в цепь переменного тока большого сопротивления. Амперметр покажет малый ток (рис. 31, а). Если железный сердечник убрать (рис. 31, б), амперметр покажет большой ток. Это произошло из-за отсутствия сильного магнитного поля, источником которого был железный сердечник, намагничиваемый током катушки.

Включаем в цепь катушки с железным сердечником диод (рис. 31, в). Амперметр вновь показывает большой ток. Вы, наверно, догадались, что диод начал выпрямлять переменный ток и постоянная составляющая выпрямленного тока намагнитила сердечник. Переменная часть магнитного поля стала малой, сопротивление уменьшилось, ток увеличился. От этого выпрямленное напряжение плавно не меняется. Пойдем дальше. Мы убедились, что включение диода как бы ликвидировало железный сердечник, что соответствует наличию в цепи только одной катушки без сердечника (рис. 31, б). Напряжение на выходе выпрямителя максимально. Как же «вернуть» катушке сердечник и тем самым уменьшить выпрямленное напряжение? С этой целью на тот же сердечник наматывается новая обмотка — обмотка управления (рис. 31, г), в которую плавно подается напряжение постоянного тока в направлении, противоположном току, возникшему от включения диода. По мере увеличения напряжения управления напряжение на выходе выпрямителя начинает уменьшаться и наконец становится близким к нулю. Таким образом цель достигнута — напряжение на выходе выпрямителя может плавно изменяться в широких пределах. Такое устройство получило название магнит-





тивление мало, напряжение постоянного тока максимально и двигатель вращается с наибольшей частотой вращения, если оно велико — двигатель вращается с наименьшей частотой вращения. Установка требуемой частоты вращения определяется положением ползунка потенциометра с индексом  $P$ . Если он находится в точке  $13$ , частота вращения минимальна, в точке  $14$  — максимальна. Промежуточное положение ползунка дает промежуточную частоту вращения, которая может плавно изменяться в диапазоне  $1:10$  (например,  $300\text{—}3000$  об/мин или  $150\text{—}1500$  об/мин).

Индуктивное сопротивление катушек с рабочими обмотками магнитного усилителя зависит от величины и направления токов в обмотках управления  $W2$  и  $W3$ . Удобнее начать с обмотки смещения  $W3$ . Величина и направление тока в этой обмотке выбирается так, чтобы характеристика вход—выход магнитного усилителя стала «нормальной», т. е. при нуле на входе и на выходе тоже был бы нуль. Если не соблюдать этого правила, то в аварийных ситуациях двигатель может раскрутиться до большой скорости.

Главной обмоткой управления является обмотка  $W2$ , ток в которой определяет степень «отпираия» магнитных усилителей. Когда он полностью «открыт», сопротивление рабочих обмоток  $W1$  минимально. Этому состоянию соответствует максимальный ток в обмотке  $W2$ , т. е. ползунок задающего потенциометра находится в точке  $14$  и частота вращения двигателя максимальна. И наоборот, когда ползунок стоит в точке  $13$ , ток в  $W2$  минимален, усилитель «закрыт» и частота вращения минимальна. Если посмотреть внимательней, то окажется, что ток в  $W2$  зависит не только от положения ползунка потенциометра  $P$ , но и от напряжения и тока через якорь двигателя. Задающее напряжение и напряжение на якоре направлены встречно. При уменьшении  $U_{\text{я}}$  разность между обоими напряжениями увеличивается, что приводит к автоматическому росту напряжения на якоре. Это и есть обратная связь по напряжению. Цель ее — совместно с обратной связью по току обеспечить прибавку к напряжению на якоре для сохранения (в заданных пределах) установленной частоты вращения при увеличении нагрузки на двигатель. При «сбросе» нагрузки прибавка автоматически сбрасывается.

Рассмотрим случай, когда нагрузка на двигатель увеличилась. Так как при этом увеличивается ток через якорь двигателя, падение напряжения на нем увеличивается. Следовательно, напряжение на якоре, а значит и частота вращения в момент наброса нагрузки уменьшаются. Это видно из выражения для определения частоты вращения двигателя постоянного тока  $n = (U_{\text{я}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}) / c_e \Phi$ . Если член уравнения  $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$  растет, то при отсутствии напряжения  $U_{\text{я}}$   $n$  падает. Для сохранения заданного уровня частоты вращения надо добавить к имеющемуся значению  $U_{\text{я}}$  величину напряжения, равную новому значению  $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ .

Вы заметили, что в схеме имеются трансформатор тока  $TA$ , выпрямитель  $V3$  и резистор  $R5$ . При росте нагрузки растет ток,

потребляемый из сети. Благодаря наличию трансформатора тока на выходе выпрямителя напряжение увеличивается и ток, проходящий через обмотку  $W2$  растет. В результате уменьшается индуктивное сопротивление обмоток  $W1$  и напряжение  $U_a$  автоматически увеличивается. Эта добавка дозируется величиной сопротивления резистора  $R5$ . Если оно мало, скорость с увеличением нагрузки резко упадет, т. е. жесткость механических характеристик будет плохая. Если  $R5$  выбрано слишком большим, возникнут автоколебания, что также недопустимо. Чтобы лучше понять основные характеристики привода, рассмотрим пример.

Вы получили с завода, например, привод типа ПМУ5М-4. Соедините между собой ненагруженный двигатель, преобразователь и задающий потенциометр. Включите в цепь якоря амперметр и поставьте задающий потенциометр в положение, соответствующее  $n_{min}$ . Включите сетевое напряжение. Если Вы не ошиблись, двигатель начнет вращаться с частотой вращения около 250 об/мин. Плавное поворачивая рукоятку задающего потенциометра, вы увидите медленное нарастание частоты вращения. Когда рукоятка дойдет до упора, значение частоты вращения составит 2500 об/мин. Снизим частоту вращения до 250 об/мин и дадим нагрузку 4 А приводу с помощью ременного тормоза или другого нагрузочного устройства. Частота вращения оказалась равной 230 об/мин. Подсчитаем, на сколько процентов упала частота вращения:  $\Delta n = (250 - 230) / 250 = 8\%$ .

Теперь можно сказать, что изменение частоты вращения привода равно 8%. Если он недогружен, то изменение частоты вращения уменьшается. Например, нагрузка составляет не 4 А, а 3 А. При этом частота вращения будет равна 240 об/мин, следовательно:  $\Delta n = (250 - 240) / 250 = 4\%$ .

Далее рассмотрим изменение частоты вращения при колебаниях напряжения сети. Произведем измерения. При нормальном напряжении 380 В  $n = 250$  об/мин, при его снижении на 10% (342 В)  $n = 200$  об/мин, а изменение составит  $(250 - 200) / 250 = 20\%$ . Принято это изменение относить к 1% изменения напряжения сети. В этом случае имеем  $20/10 = 2\%$  на 1% изменения напряжения сети. Такое изменение частоты вращения можно снизить. Для этого необходимо установить стабилизатор напряжения, питающий задающий потенциометр. С этой целью надо отключить трансформатор  $TV$  от сети и питать задатчик от стабилизатора. При этом погрешность снизится более чем вдвое.

Однофазные схемы применяли для приводов мощностью до 0,5 кВт. Для приводов мощностью св. 0,5 кВт применяется трехфазная схема (рис. 32, б), обладающая таким ценным качеством, как минимальная пульсация тока в цепи якоря, что обеспечивает практически полное использование двигателя по моменту. Силовая часть привода содержит шесть рабочих обмоток магнитного усилителя  $W1$ , включенных в плечи трехфазного мостового выпрямителя  $V1$ . Три обмотки управления  $W2$  соединены последовательно и питаются от задающего потенциометра  $P$ . Сигнал обратной

связи по току формируется трансформатором тока  $TA$ , выпрямляется и подается на резистор  $R5$ . Трансформатор и выпрямитель  $V2$  служат для питания  $ОВМ$  и питания задающего потенциометра  $P$ . Схема управления ничем не отличается от описанной для однофазных приводов.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ПМУ-П

Привод по системе ПМУ-П обеспечивает диапазон регулирования не более  $1:10$ . В то же время для многих узлов станков и машин необходим более широкий диапазон регулирования, достигающий величины до  $1:100$  и выше. Есть потребители, требующие уменьшения величины погрешности поддержания скорости. Это привело к созданию привода, получившего наименование ПМУ-П. Основным отличием приводов ПМУ-П от ПМУ и ПМУ-М является наличие дополнительного транзисторного (полупроводникового) усилителя, обратной связи по частоте вращения и силовой цепи, собранной на магнитных усилителях с самонасыщением и вынесенным мостом.

Назначение промежуточного транзисторного усилителя — увеличение коэффициента усиления системы регулирования для получения широкого диапазона регулирования. Кроме того, это способствует улучшению динамических свойств привода. Обратная связь по частоте вращения, осуществляемая с помощью пристраиваемого к двигателю тахогенератора, обеспечивает уменьшение величины погрешности привода.

Применение схемы силовой цепи с вынесенным мостом дает снижение величины наводок трансформаторной ЭДС в цепи управления. Это позволяет лучше использовать усилительные свойства схемы. Структурная схема электропривода серии ПМУ-П приведена на рис. 33. Якорь двигателя  $M$  питается от трехфазной сети переменного тока через трехфазный магнитный усилитель  $МУ$  с шестью рабочими обмотками и вентилями. Обмотка возбуждения  $ОВМ$  двигателя питается от той же сети через трансформатор напряжения. Одна из обмоток управления магнитного усилителя служит обмоткой смещения. Трехкаскадный транзисторный усилитель  $ПУ$ , на выходе которого в качестве нагрузки включена основная обмотка управления, служит для увеличения общего коэффициента усиления системы регулирования магнитного усилителя.

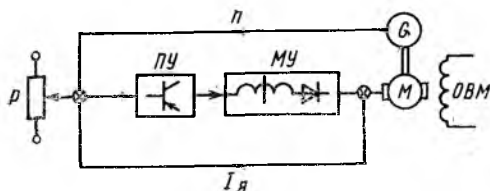


Рис. 33. Схема электропривода серии ПМУ-П

Разность напряжений задатчика  $P$  и тахогенератора подается на вход транзисторного усилителя  $ПУ$ . Усиленный сигнал подается на обмотку управления магнитного усилителя  $МУ$ , от величины тока в которой зависит

напряжение на выходе магнитного усилителя (на якоре двигателя). Для обеспечения устойчивости регулирования в схему введено стабилизирующее дифференцирующее звено. Транзисторный усилитель имеет три каскада, включенные по схеме с общим эмиттером.

Вход усилителя зашунтирован диодами, которые осуществляют защиту от перенапряжений, возникающих при пуске, остановке и резких изменениях задающего напряжения. Диоды не влияют на работу усилителя при номинальных сигналах, так как порог отпирания их выше максимального уровня сигнала на входе транзисторного усилителя. В приводах серии ПМУ-П, предназначенных для частых включений, предусмотрена схема ограничения тока.

### НЕРЕВЕРСИВНЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИЙ ЭТО1, ЭТО2, ЭТОШ1, ЭТОШ2

Эти электроприводы, применяемые без силовых трансформаторов, предназначены для плавного регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока мощностью 0,09—1,8 кВт. Они заменили электроприводы серии ПМУ. Приводы серии ЭТО1 питаются от сети однофазного переменного тока напряжением 220 В, серии ЭТО2 — от однофазной сети напряжением 220 и 380 В. Диапазоны регулирования частоты вращения приводов серий ЭТО1 и ЭТО2 — 1 : 20; ЭТОШ1 — 1 : 100; ЭТОШ2 — 1 : 200. Отклонение частоты вращения двигателей от установленной при изменении нагрузки от 10 до 100% равно  $\pm (5 \dots 10) \%$ , при изменении напряжения сети на  $\pm 10 \%$  не более  $\pm 5 \%$ .

Силовая часть электропривода серии ЭТО1 (рис. 34) содержит однофазный мостовой неуправляемый выпрямитель (V1—V4) и один тиристор V5, изменяющий напряжение постоянного тока, подводимого к якору двигателя М. На управляющий электрод тиристора подается напряжение от импульсного трансформатора TV3, вторичная обмотка которого соединена с тиристором V5. Управляющий импульс сдвигается по фазе при помощи постоянной составляющей на выходе транзисторного усилителя А, управляющего блоком БУ. На вход усилителя А подается разность между задающим напряжением, снимаемым с потенциометра R23, и напряжением обратной связи по противо-ЭДС, снимаемым с тахометрического моста, образованного двигателем М и резисторами

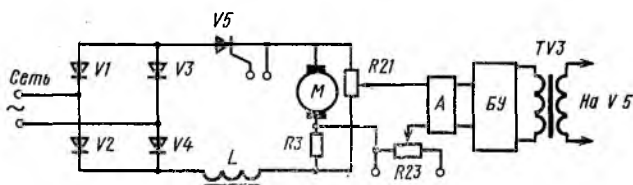


Рис. 34. Электросхема привода серии ЭТО1

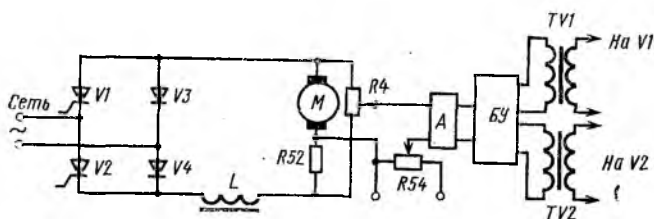


Рис. 35. Электросхема привода серии ЭТО2

$R3$ ,  $R21$ . Для повышения коэффициента формы тока в цепь якоря включен дроссель  $L$ .

Схема электропривода ЭТО2 (рис. 35) представляет собою полупроводимый однофазный мост, состоящий из тиристоров  $V1$ ,  $V2$  и диодов  $V3$ ,  $V4$ . В основном схема идентична схеме электропривода серии ЭТО1, за исключением наличия на выходе БУ не одного, а двух импульсных трансформаторов  $TV1$  и  $TV2$ , формирующих импульсы управления тиристорами  $V1$  и  $V2$ .

Повышение диапазона регулирования частоты вращения электроприводов серий ЭТОШ1 и ЭТОШ2 достигается заменой обратной связи по противо-ЭДС обратной связью по частоте вращения, реализуемой при помощи тахогенератора, и соответствующим повышением коэффициента усиления системы регулирования. Остальные блоки построены на основе приводов серий ЭТО1 и ЭТО2.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИЙ ПТЗ И ПТЗР

Основное назначение электроприводов серий ПТЗ и ПТЗР — замена устаревших приводов серии ЭМУ-Д. В сочетании с двигателями серии ПБСТ со встроенными тахогенераторами приводы обеспечивают диапазон регулирования до 1:2000. Серия ПТЗР имеет реверсивное исполнение, серия ПТЗ — нереверсивное. Диапазон мощностей 0,85—11 кВт.

Схема электроприводов серий ПТЗР, ПТЗ приведена на рис. 36, а. Питание двигателя — от тиристорного преобразователя  $ТП$  по трехфазной мостовой схеме (привод серии ПТЗ) или двухкомплектной трехфазной схеме с нулевым выводом (привод серии ПТЗР) от сети переменного тока через силовой трехфазный трансформатор  $TV$ . Двигатель  $M$  запускается подачей управляющего напряжения от задатчика скорости (ЗС) на систему управления при предварительно включенном силовом трансформаторе  $TV$  и промежуточном усилителе. При пуске на большие частоты вращения, а также перегрузках включается схема токоограничения якоря до допустимой величины. Обмотки возбуждения двигателя (ОВД) и тахогенератора (ОВТГ) питаются от встроенного источника.

В реверсивном (четырёхквadrантном) электроприводе серии ПТЗР при снижении задающего напряжения изменяется полярность напряжения на входе усилителя. Двигатель автоматически

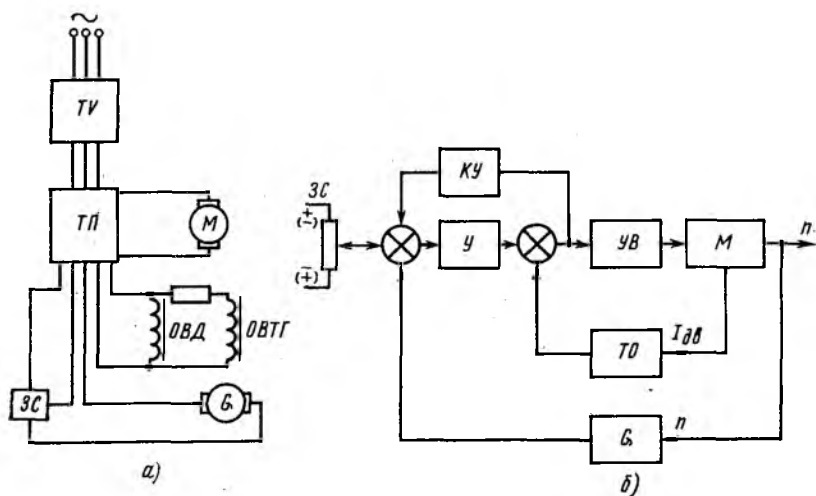


Рис. 36. Структурная схема электропривода серий ПТЗ и ПТЗР

переходит в режим рекуперативного торможения. В серии ПТЗ в этом режиме срабатывает поляризованное реле, включающее тормозной контактор, затем двигатель переходит в режим динамического торможения. Одновременно эта цепочка выполняет функции защиты привода в аварийных режимах, в том числе приводящих к увеличению частоты вращения свыше установленной. При коротких замыканиях и длительных перегрузках электропривод отключается от сети автоматическим выключателем. В приводах применены лавинные тиристоры.

Для обеспечения широкого диапазона изменения частоты вращения предусмотрена система автоматического регулирования, замкнутая по частоте вращения через усилитель с высоким коэффициентом усиления. Система регулирования (рис. 36, б) состоит из усилителя  $У$ , корректирующего устройства  $КУ$ , системы токоограничения  $ТО$ , управляемого выпрямителя  $УВ$ , двигателя  $М$  и тахогенератора  $Г$ . Разность сигналов напряжения от задатчика скорости  $ЗС$  и сигнала обратной связи (от тахогенератора) поступает на вход промежуточного усилителя  $У$ . Усиленный сигнал накладывается на периодическое пилообразное напряжение, формируемое блоком пилообразных напряжений, и подается на вход блоков управления, формирующих импульсы управления тиристорами.

Знак и величина сигнала от задатчика определяют направление вращения двигателя. Для обеспечения устойчивости системы привода служит корректирующее устройство  $КУ$  в виде интегро-дифференцирующего звена, охватывающего усилитель  $У$ . Тиристорные преобразователи содержат силовой выпрямитель на шести тиристорах, блоки управления тиристорами, блоки пилообразных напряжений, блок питания, промежуточный транзисторный усили-

тель, корректирующую цепь, блок питания обмоток возбуждения двигателя и тахогенератора, релейно-контакторную аппаратуру. Функциональные связи схем и их подробное описание приведены в работе [6]. В комплект поставки привода входят электродвигатель серии ПБСТ, преобразователь, силовой трехфазный трансформатор, ступенчатый задатчик частоты вращения на 36 положений и два уравнильных реактора.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ПТР-0,4М

Для мощности 120—350 Вт серийно изготавливали транзисторный электропривод серии ПТР-0,4М с широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающий диапазон регулирования 1:120 с автоматическим бесконтактным торможением. Электропривод представляет собой замкнутую систему регулирования с отрицательной обратной связью по частоте вращения и гибкой обратной связью по току. Схема привода показана на рис. 37, а. Силовая часть преобразователя состоит из транзисторных ключей  $V1$  и  $V2$ , коммутирующих напряжение на якоре двигателя  $M$  с частотой, задаваемой широтно-импульсным модулятором ШИМ, и узла токоограничения БРТО. Для питания двигателя с номинальным напряжением 110 В каждый ключ состоит из трех последовательно соединенных транзисторов.

Остановимся на принципе действия транзисторного ключа. В отличие от тиристорных электроприводов изменение напряжения постоянного тока здесь достигается изменением времени включенного состояния транзистора, или изменением скважности. Чем больше время включенного состояния транзисторного ключа, тем выше среднее значение напряжения подводимого к якору двигателя. Скважность определяется из выражения  $\lambda = \tau_{\text{вкл}} / (\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{откл}})$ , где  $\tau_{\text{вкл}}$  — время включенного состояния транзистора;  $\tau_{\text{откл}}$  — время выключенного состояния транзистора.

Зависимость среднего значения напряжения ( $U_{\text{ср}}$ ), подводимого к якору, от напряжения питания постоянного тока ( $U_{\text{п}}$ ):  $U_{\text{ср}} =$

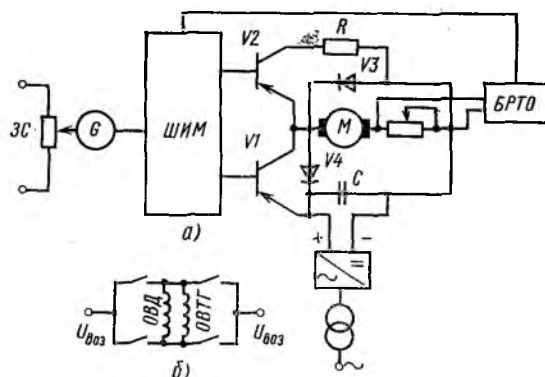


Рис. 37. Функциональная схема электропривода серии ПТР-0,4М

**АУп.** Таким образом, изменяя скважность, можно плавно менять напряжение постоянного тока, подводимого к якору двигателя.

Каждая группа выпрямитель — ключ шунтируется диодами  $V_3, V_4$  для защиты транзисторов от перенапряжений. Если один из ключей при подаче запирающих сигналов управления переходит в режим отсечки раньше других, то ток двух оставшихся ключей замыкается через шунтирующий диод. Во время пауз между импульсами ток якоря замыкается через три шунтирующих диода. Для получения требуемого тока через якорь двигателя транзисторы соединены параллельно. С целью равномерной загрузки транзисторов в базовые и коллекторные цепи включаются уравнивающие резисторы.

Для получения большего коэффициента усиления по мощности схему силового ключа выполняют в виде составного транзистора. Для реализации торможения, кроме основных ключей, в схеме привода предусмотрены три вспомогательных ключа, проводящих ток только во время пауз. При подаче импульсов напряжения на якорь вспомогательные ключи автоматически запираются. Последовательно с каждым ключом включен резистор динамического торможения. При торможении вспомогательные ключи создают направление тока якоря, противоположное рабочему, в результате двигатель тормозится эффективнее.

Силовые ключи (основные и вспомогательные) управляются одним широтно-импульсным модулятором, предназначенным для преобразования постоянного по знаку сигнала в прямоугольные импульсы переменной скважности. Чтобы преобразователь имел постоянный коэффициент усиления по напряжению, широтно-импульсный модулятор имеет линейную зависимость коэффициента заполнения от изменения сигнала на входе. Реверс двигателя (см. рис. 37,б), выполняемый при помощи реле, достигается изменением полярности обмоток возбуждения двигателя (ОВД) и тахогенератора (ОВТГ).

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТ1Е И ЭТ1Т

Преимущество электроприводов серии ЭТ1Е перед приводами серии ЭТО состоит в уменьшении массы и размеров и увеличении диапазона регулирования до 1 : 50. Серия состоит из двух видов: ЭТ1Е1, ЭТ1Е2 (с обратной связью по ЭДС, без тахогенератора) и ЭТ1Т1, ЭТ1Т2 (с обратной связью по частоте вращения, с тахогенератором). В последнем случае диапазон регулирования 1 : 1000.

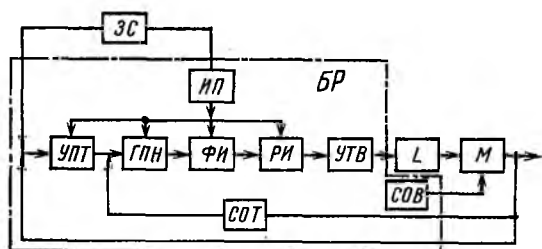
Устройство привода становится понятным из рассмотрения функциональной схемы (рис. 38,а). Блок регулирования  $БР$  состоит из управляемого тиристорного выпрямителя, дросселя  $L$  и двигателя  $M$  (УТВ), усилителя постоянного тока (УПТ), генератора пилообразного напряжения (ГПН), формирователя импульсов (ФИ), распределителя импульсов (РИ), источника питания



(ИП), схемы ограничения тока (СОТ), стабилизатора обмотки возбуждения (СОВ).

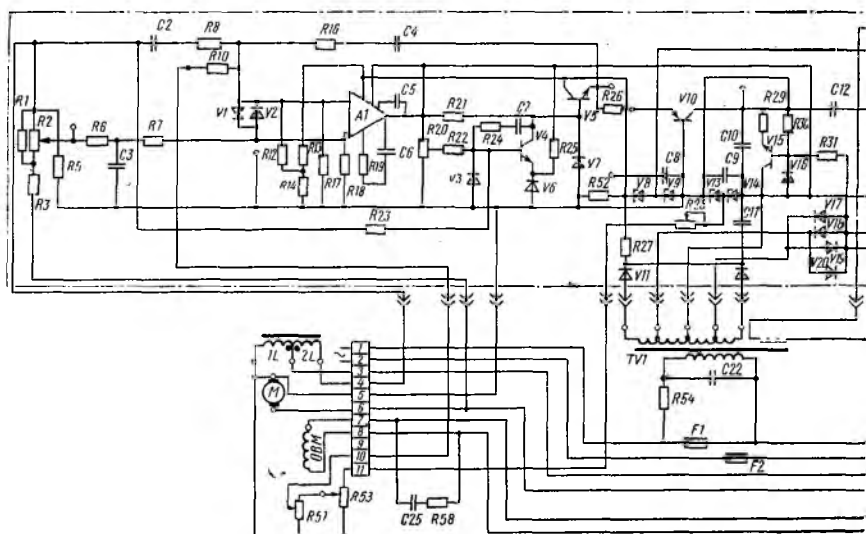
УТВ служит для преобразования переменного напряжения в регулируемое выпрямленное напряжение. УТВ представляет собой однофазный полууправляемый выпрямительный мост, состоящий (рис. 38, б) из вентиля V43, V44 и тиристоров V45, V46. Цепи R55, C20, R56, C21, R58 и C25 служат для защиты тиристоров и вентиля от коммутационных перенапряжений и перенапряжений, возникающих в первичной сети. Защита от короткого замыкания осуществляется предохранителями F1, F2.

УПТ служит для вычитания сигналов задатчика скорости и отрицательной обратной связи с тахомоста 1L, 2L, М для типов размеров ЭТ1Е1, ЭТ1Е2, с тахогенератора для типов размеров ЭТ1Т1, ЭТ1Т2 и усиления разностного сигнала. Усилитель собран на микросхеме А1. Цепь обратной связи усилителя R16, C4 служит для обеспечения устойчивости и формирования необходимой динамики привода. Цепи R19, C6, C5 обеспечивают устойчивую работу усилителя А1.



а)

Рис. 38. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы электропривода серии ЭТ1Е1



б)



Выпрямитель стабилизатора собран по однофазной мостовой схеме, в плечи которого включены один тиристор и три диода. Тиристор обеспечивает стабильное напряжение на обмотке возбуждения двигателя независимо от колебаний сетевого напряжения. С этой целью тиристор управляется от схемы с обратной связью по напряжению на обмотке возбуждения двигателя. Схема состоит из фильтра *R51*, *C17*, транзистора *V35*, диода *V38*, резисторов *R47*, *R48* и усилителя постоянного тока (транзистор *V34*, резисторы *R45*, *R43*, конденсатора *C18* и однопереходного транзистора *V37*). При применении двигателя с номинальным напряжением 110 В диоды *V40* и *V42* исключаются.

Принцип работы блока регулирования основан на описанном ранее свойстве управляемых вентилях изменять в широких пределах среднее значение выпрямленного напряжения путем изменения времени отпирания тиристоров по отношению к началу положительной полуволны подводимого переменного напряжения. Сглаживание выпрямленного напряжения *УТВ* происходит посредством фильтра, образованного индуктивностью дросселя и сопротивлением ротора. На вход *УПТ* подаются два сигнала: один с выхода тахомоста (для типоразмеров ЭТ1Е1, ЭТ1Е2) или с тахогенератора (для типоразмеров ЭТ1Т1, ЭТ1Т2), пропорциональный частоте вращения двигателя, а другой — от задатчика скорости. Эти напряжения вычитаются. Усиленный разностный сигнал обеспечивает определенную величину зарядного тока накопительной емкости *C10* через транзистор *V10*. В зависимости от величины зарядного тока меняется время заряда емкости до напряжения, равного пороговому уровню срабатывания однопереходного транзистора *V23*, с которым связан момент формирования импульсов, что приводит к изменению момента отпирания тиристоров. Таким образом, изменение напряжения на входе усилителя вызывает соответствующие изменения напряжения на двигателе.

Генератор *ГПН* вырабатывает пилообразное напряжение частотой 100 Гц. Генератор имеет автономный источник питания. Режим работы транзистора *V15* выбран так, что большую часть полупериода он закрыт напряжением, поступающим через диоды *V17*, *V18* в виде пульсаций частотой 100 Гц, а конденсатор *C16* заряжается через транзистор *V10*. В момент времени, когда напряжение смещения, поступающее через резистор *R30*, становится больше напряжения пульсации, поступающего через диоды *V17*, *V18*, транзистор *V15* открывается и емкость *C10* быстро разряжается. Поскольку заряд конденсатора происходит от источника тока (транзистор *V10*), пилообразное напряжение имеет хорошую линейность.

Схема **формирователя импульсов** собрана на однопереходном транзисторе *V23*, имеющем падающий участок вольтамперной характеристики, т. е. участок отрицательного динамического сопротивления, и представляет собой ждущий генератор. В момент времени, когда напряжение на накопительном конденсаторе *C10* (*ГПН*) достигает порога срабатывания однопереходного транзи-

тока  $V23$ , вырабатывается импульс. Параметры импульса определяются в основном параметрами однопереходного транзистора  $V23$ , источником питания и сопротивлением резистора  $R32$ . Блокировка второго за полупериод импульса генератора происходит за счет того, что порог срабатывания однопереходного транзистора как бы повышается, так как происходит заряд конденсатора  $C12$  через однопереходный транзистор  $V23$  и потенциал его эмиттера понижается. Восстановление схемы происходит при разряде конденсатора  $C10$  через транзистор  $V15$  и разряде конденсатора  $C12$  через транзистор  $V15$  и диод  $V21$ .

Схема  $PI$  собрана на транзисторах  $V26$ ,  $V27$ . Транзисторы открываются поочередно: один — в один полупериод, другой — в следующий полупериод. Прямоугольный импульс управления тиристорами проходит по очереди через открытые транзисторы. Затем управляющие импульсы через согласующие усилительные каскады, собранные на транзисторах  $V28$ ,  $V29$ , поступают на входы управления тириستоров через трансформаторы  $TV2$  и  $TV3$ . Для формирования сигнала обратной связи по противо-ЭДС применяется схема тахомоста, состоящего из якоря  $M$ , дросселя  $L1$ , дросселя  $L2$  и комбинации резисторов  $R1$ ,  $R2$  и  $R3$ .

Напряжение, пропорциональное току якоря, и необходимое для работы системы токоограничения, снимается с двух встречно включенных обмоток (силовой и компенсационной) и при равенстве потоков этих обмоток будет пропорционально только току якоря. Применение дросселя позволяет полнее использовать номинальную мощность двигателя. Задатчик скорости (резистор  $R53$ ) служит для приводов серии ЭТ1Е1, ЭТ1Е2 и задатчики скорости (резисторы  $R53$ ,  $R57$ ) — для приводов серии ЭТ1Т1, ЭТ1Т2.

Рассмотрим работу привода на холостом ходу. Пусть задатчиком скорости установлено определенное напряжение задания  $U_z$ . Двигатель вращается и создает определенную противо-ЭДС ( $E$ ). При некотором напряжении  $U_{ПТ}$ , равном  $K \cdot E = U_z$ , где  $K$  — коэффициент передачи тахомоста для ЭТ1Е1, ЭТ1Е2 и тахогенератора ЭТ1Е1, ЭТ1Т2, соответствует определенный положительный потенциал на выходе  $U_{ПТ}$  ( $A1$ ) относительно общей точки. Этому потенциалу соответствует определенный зарядный ток накопительного конденсатора  $C10$  через транзистор  $V10$ , а значит и определенное время заряда  $C10$  до порогового напряжения пробоя однопереходного транзистора  $V23$  формирователя импульсов.

Следовательно, тиристоры  $V45$ ,  $V46$  будут открываться в соответствующие этим параметрам моменты времени. Напряжение на выходе  $УТВ$  соответствует оборотам двигателя. Схема автоматического регулирования находится в устойчивом состоянии, которое обеспечивается корректирующими цепями:  $R16$ ,  $C4$  и  $R8$ ,  $C2$  (обеспечивая обратная связь по току). Если изменить положение задатчика скорости, например, поставить задатчик в положение, соответствующее более высокой частоте вращения двигателя, то при этом увеличивается  $U_z$ . Так как напряжение задания подается на ведущий вход  $U_{ПТ}$  ( $A1$ ) в виде отрицательного напряже-

ния, то потенциал на выходе УПТ (А1) становится более положительным; величина зарядного тока конденсатора С10 возрастает; время заряда до порогового уровня срабатывания однопереходного транзистора V23 уменьшается; импульсы управления появляются раньше, чем в предыдущем случае; тиристоры тоже открываются раньше и напряжение на выходе УТВ увеличивается. Двигатель начинает вращаться быстрее. Изменение положения ЗС в сторону уменьшения оборотов двигателя приводит аналогичным образом к уменьшению напряжения УТВ, а значит и оборотов двигателя.

При увеличении нагрузки на вал двигателя возрастает ток якоря и падение напряжения на нем. Увеличение падения напряжения на якоре двигателя при постоянном напряжении (УТВ) приводит к уменьшению его электродвижущей силы  $E$ , а значит к уменьшению частоты вращения. Однако уменьшение частоты вращения при неизменном  $U_a$  приводит к увеличению сигнала рассогласования  $U_{вх}$ , а значит к увеличению напряжения УТВ.

При изменении нагрузки на вал двигателя при неизменном положении ЗС автоматически изменяется напряжение на выходе УТВ, таким образом компенсируется падение напряжения  $I_a R_a$ , т. е. изменение частоты вращения двигателя в приводах ЭТ1Е1, ЭТ1Е2. В приводах ЭТ1Т1, ЭТ1Т2 работа происходит аналогично, с той только разницей, что входной сигнал усилителя  $U_{вх} = U_{тг} - U_a$ , где  $U_{тг}$  — сигнал с тахогенератора;  $U_a$  — сигнал с ЗС.

К переходным относятся режимы, при которых происходят быстрые изменения частоты вращения или нагрузки на вал двигателя. При быстром уменьшении частоты вращения или нагрузки на вал двигателя схема привода работает, как указано выше. В режиме быстрого увеличения частоты вращения или нагрузки на вал двигателя могут возникнуть дополнительные нежелательные явления. Так, при пуске электродвигателя в первый момент, когда  $K \times E = 0$  для ЭТ1Е1, ЭТ1Е2 или напряжение на тахогенераторе равно нулю для ЭТ1Т1, ЭТ1Т2, напряжение  $U_{вх}$  достигает значительной величины, при которой возможен пробой микросхемы А1. В этом случае УТВ выдает максимально большое напряжение, при котором через якорь двигателя протекает недопустимо большой ток. Во избежание этого включена цепь V1, V2, R13, R14, R12, осуществляющая защиту микросхемы от перенапряжений. Защита двигателя от недопустимо больших токов осуществляется СОТ.

Схема ограничения тока представляет из себя такую же систему регулирования, как и основная цепь привода с той разницей, что она имеет существенно меньший коэффициент усиления (поскольку исключается микросхема А1). СОТ фиксирует определенное значение тока якоря, зависящее от потенциала уставки, снимаемого с резистора R20 (обычно фиксируемый ток уставки  $I_{уст} = (2-4)I_{ном.дв}$ ). Информация о истинном токе двигателя поступает с обеих обмоток дросселя.

Схема ограничения тока работает следующим образом: если ток превышает установленное значение уставки (тока отсечки), срабатывает схема сравнения, состоящая из резисторов  $R_{22}$ ,  $R_{20}$  одной стороны, и резистора  $R_{23}$  с другой стороны, включенных базы транзистора  $V_4$ . Транзистор  $V_4$  открывается и шунтирует выход микросхемы  $A1$ , что снижает ток якоря до допустимого значения. Для устойчивой работы  $COT$ , как системы регулирования, включена цепь  $R_{24}$ ,  $C_7$ . При номинальном токе якоря транзистор  $V_4$  закрыт и на работу привода влияния не оказывает.

Схема пуска привода должна обеспечивать такую последовательность, чтобы обмотка возбуждения двигателя включалась раньше или, в крайнем случае, одновременно с цепью якоря двигателя. Включение цепи якоря можно осуществлять двумя способами: включением сетевого напряжения или замыканием цепи якоря. Число включений привода ограничивается числом включений двигателя. Отключение привода можно производить в цепи сети переменного тока или в цепи якоря. При этом следует составить схему так, чтобы обмотка возбуждения двигателя отключалась позже якоря, либо вовсе не отключалась.

Приводы ЭТ1 с реверсивным двигателем допускают реверсирование изменением полярности в цепи якоря или в цепи возбуждения двигателя. Реверсирование рекомендуется осуществлять после отключения привода от сети и полной остановки двигателя. Погрешность частоты вращения при реверсе не нормируется. Коммутационная аппаратура для осуществления реверса в состав привода не входит. Реверс привода допускается с помощью реверсивного контактора в цепи якоря, если реверс осуществляется без отключения привода от сети. При этом необходимо на время реверса разрывать контакт  $11$  на клеммном наборе блока регулирования.

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТАНКОВ И СТАНКОВ С ЧПУ

Отличительные особенности приводов для станков с ЧПУ и высокоавтоматизированных станков — широкий диапазон регулирования, высокие быстродействие, точность и равномерность перемещений, малая колебательность частоты вращения при возмущениях. Эти свойства приводов позволяют получить требуемую точность обработки при высокой производительности станков, а также обеспечить согласование привода с системой ЧПУ и механической частью станка. Схемы электроприводов станков с ЧПУ по сравнению со схемами приводов общего назначения значительно сложнее; как правило, они имеют многоконтурную структуру с различными внутренними обратными связями. Силовые схемы преобразователей или широтно-импульсные, или многофазные управляемые выпрямители. Схемы управления и усилители строятся с применением микроэлектроники, что позволяет получать сравни-

тельно малоразмерные приводы с расширенными техническими возможностями.

Наибольшее быстроедействие и наилучшее использование двигателя по моменту обеспечивают широтно-импульсные приводы с высокой частотой переключения. Такие приводы по сравнению с тиристорными имеют более простую силовую схему вследствие полной управляемости транзисторов, но ограничены по мощности из-за меньшей мощности и меньшей перегрузочной способности транзисторов по сравнению с тиристорами.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТЗР

Один из наиболее распространенных отечественных приводов, применяемых в механизмах подач высокоточных станков и станков с ЧПУ, — тиристорный привод серии ЭТЗР, предназначенный для изменения в широких пределах скорости рабочих органов (следящий привод серии ЭТЗС представляет собой модификацию регулируемого привода серии ЭТЗР). Привод серии ЭТЗР — усовершенствованная модель электропривода серии ПТЗР, поэтому ниже рассмотрены только новые решения, появившиеся в этом приводе.

Реверсивный электропривод серии ЭТЗР, предназначенный для работы в четырех квадрантах, обеспечивает диапазон изменения частоты вращения двигателя 1:1000. Частота вращения регулируется изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя. В качестве исполнительных двигателей в приводах подач чаще всего применяют двигатели серий ПБСТ и ПГТ. Диапазон мощностей привода 0,85—11 кВт. Минимальная частота вращения двигателя, при которой сохраняются параметры привода, 3 об/мин. Отклонение частоты вращения при изменении нагрузки от  $0,1 M_{\text{ном}}$  до  $M_{\text{ном}}$  не должно превышать  $\pm 0,5\%$  при  $n = n_{\text{ном}}$ ;  $\pm 0,5\%$  при  $n \geq 100$  об/мин;  $\pm 5\%$  при  $100 < n \leq 10$  об/мин;  $\pm 10\%$  при  $10 < n \leq 3$  об/мин.

При изменении нагрузки от  $0,1 M_{\text{ном}}$  до  $M_{\text{ном}}$ , напряжения питающей сети — от  $0,9 U_{\text{ном}}$  до  $1,1 U_{\text{ном}}$  и температуры — от 20 до  $45^\circ\text{C}$  суммарное отклонение частоты вращения двигателя не должно превышать  $\pm 2\%$  при  $n \geq 100$  об/мин;  $\pm 15\%$  при  $n \geq 10$  об/мин;  $\pm 25\%$  при  $n \geq 3$  об/мин. Путь торможения двигателя с частоты вращения 1,5 об/мин при снятии задающего сигнала не должен превышать  $1^\circ$ . Расчетный срок службы не менее 12 лет, вероятность безотказной работы за период 4000 ч — 0,94.

Тиристорный электропривод серии ЭТЗР представляет собой одноконтурную систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по частоте вращения (рис. 39). На вход электропривода поступает задающий сигнал от стабилизированного источника напряжения, находящегося в преобразователе (3 — задатчик частоты вращения двигателя). Сигнал алгебраически суммируется с корректирующими сигналами, поступающими из цепи коррекции  $KU1$  и цепи коррекции тахогенератора  $KU2$ ,

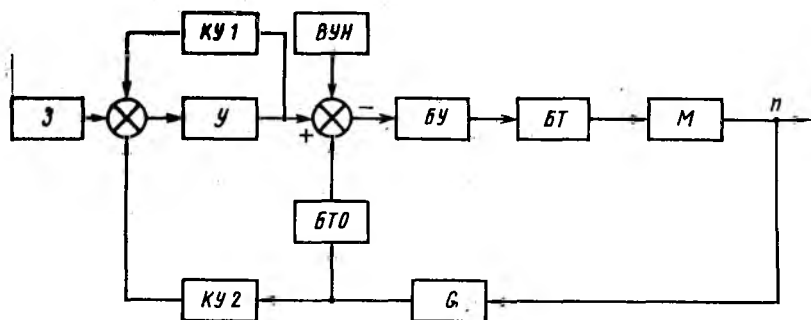


Рис. 39. Структурная схема электропривода серии ЭТЗР

и идет на вход промежуточного усилителя  $У$ . Сумма синусоидального управляющего напряжения, поступающего от блока управляющих напряжений ( $ВУН$ ) и усиленного сигнала с выхода усилителя  $У$ , подается на блок управления  $БУ$ , формирующий импульсы управления силовыми тиристорами ( $БТ$  — блок тиристов). Фаза выходных импульсов блока управления зависит от величины и знака выходного напряжения усилителя. С другой стороны, фаза управляющих импульсов определяет угол проводимости тиристов, напряжение на якоре двигателя  $U_a$  и, как следствие, частоту вращения  $n$ . Для формирования требуемых динамических характеристик привода применены корректирующие устройства  $КУ1$  и  $КУ2$ . Блок токоограничения  $БТО$  предназначен для ограничения тока при перегрузках и в переходных режимах до некоторой величины, зависящей от типа применяемого электродвигателя и ограничений, накладываемых механизмом. Комплектный тиристорный электропривод включает тиристорный преобразователь, электродвигатель  $М$  с тахогенератором  $G$ , трехфазный трансформатор, реакторы и задатчик скорости.

Тиристорный преобразователь электропривода серии ЭТЗР имеет блоки: тиристов, промежуточного усилителя с коррекцией и токоограничением, управляющих напряжений, управления тиристорами и питания; панели питания обмотки возбуждения тахогенератора и индикатора чередования фаз, а также релейно-контакторную аппаратуру. В следящем приводе серии ЭТЗС имеется блок связи, преобразующий в аналоговую форму идущие от ЧПУ импульсные сигналы. Кратко остановимся на основных частях привода.

**Блок тиристов  $БТ$ .** Тиристоры, образующие силовой управляемый выпрямитель по трехфазной нулевой схеме, соединены по двухкомплектной встречно-параллельной схеме с согласованным управлением и уравнительными реакторами.

**Блок промежуточного усилителя** включает следующие функциональные устройства: промежуточный усилитель  $У$ , состоящий из усилителей напряжения и мощности, блоки коррекции  $КУ1$  и  $КУ2$  и блок токоограничения  $БТО$ . Усилитель напряжения собран



на микросхеме, а усилитель мощности — на транзисторах. В промежуточном усилителе предусмотрена схема, предназначенная для компенсации падения напряжения на переходе база — эмиттер транзистора. Корректирующие устройства  $KU1$  и  $KU2$  выполнены на резистивно-емкостных элементах. Устройство  $KU1$  охватывает обратной связью усилитель. Блок упреждающего токоограничения работает по известному принципу [3] с той лишь разницей, что сигнал, пропорциональный частоте вращения, снимается с тахогенератора, а не с тахометрического моста, как это сделано в приводе-серии ПТЗР.

*Блок управляющих напряжений.* БУН создает три разворачивающих напряжения синусоидальной формы, сдвинутых на  $120^\circ$ . Разворачивающие напряжения формируются из этих напряжений двойным электрическим интегрированием и последующим суммированием. В результате создается помехоустойчивая система управления; наличие импульсов на вершинах синусоид гарантирует наличие управляющих импульсов на тиристорах в переходных режимах. Синусоидальная форма управляющих напряжений позволяет использовать три канала управления для шести тиристоров, так как одно напряжение формирует сразу два импульса управления для двух тиристоров, питающихся от одной фазы трансформатора.

*Блок управления тиристорами* суммирует напряжения, подаваемые от блока БУН и усилителя  $У$ , формирует управляющие импульсы, распределяет их по тиристорам и изменяет фазу импульсов по отношению к напряжениям, питающим тиристоры. Выходные каскады собраны по схеме усиления (в отличие от привода серии ПТЗР, имеющего на выходе блока управления блокинг-генераторы). Такое решение повышает помехоустойчивость блока управления.

*Панель питания обмотки возбуждения тахогенератора.* На панели собраны стабилизатор тока возбуждения тахогенератора последовательного типа, использующий задатчик эталонного напряжения на прецизионном стабилитроне, сигнал обратной связи по току, снимаемый с сопротивления в цепи регулирующего транзистора, и двухкаскадный усилитель. Этот же стабилизатор может быть использован как источник задающего напряжения. Остальные узлы преобразователя не рассмотрены, так как не имеют принципиально новых решений.

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТШР

Эти электроприводы выпускают четырех типоразмеров и поставляют комплектно. Для обеспечения высокого быстродействия привода и большого коэффициента использования двигателя по току вместо управляемых выпрямителей используют широтно-импульсные преобразователи. Диапазон мощностей привода 0,18—1,15 кВт. В качестве исполнительных двигателей применяют двигатели серий ПБСТ и ПСТ. Частота вращения изменяется регу-

дированием напряжения, подаваемого на якорь двигателя, а диапазон регулирования 1 : 6000.

Изменение частоты вращения на нижней ступени при изменении нагрузки от  $0,15 M_{\text{ном}}$  до  $M_{\text{ном}}$  не более  $\pm 15\%$ . Динамическая ошибка при увеличении нагрузки не более  $90\%$  при времени переходного процесса не более  $0,1$  с для частоты вращения  $n=1$  об/мин. Область применения — механизмы подачи координатно-расточных и резьбошлифовальных станков, а также станков с ЧПУ.

Структурная схема электропривода аналогична схеме привода серии ЭТЗР — одноконтурная система с отрицательной обратной связью по скорости. Силовая схема электропривода серии ЭТШР состоит из реверсивного моста на четырех тиристорах, генератора гасящих импульсов на двух тиристорах, моста из четырех силовых диодов разрядного устройства на тиристоре, конденсаторных батарей и дросселей в силовой цепи. Система управления тиристорным преобразователем вырабатывает две серии импульсов с постоянной частотой  $1000$  Гц, но переменной скважностью, определяемой разностью между задающим напряжением и напряжением тахогенератора.

Усилитель собран по схеме двойного преобразования на несущей частоте  $20$  кГц. Помимо основного корректирующего звена, представляющего собой охват усилителя  $RC$ -цепочкой, имеются звенья, стабилизирующие работу отдельных каскадов усилителя. Кроме того, имеется гибкая отрицательная связь по току. В приводе предусмотрено устройство токоограничения и защиты от коротких замыканий.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТЗИ

Серийно освоен реверсивный тиристорный электропривод ЭТЗИ (электропривод тиристорный трехфазный с интегральными микросхемами) [6]. В нем используются 11 микросхем. Схема силовой части содержит силовой трансформатор и шесть тириستоров, собранных по трехфазной нулевой схеме. С целью получения непрерывных токов в цепи якоря (прерывистые токи ухудшают коэффициент использования двигателя по моменту и усложняют систему управления тиристорами) выбрана схема согласованного управления тиристорами.

Структурная схема электропривода приведена на рис. 40, а.

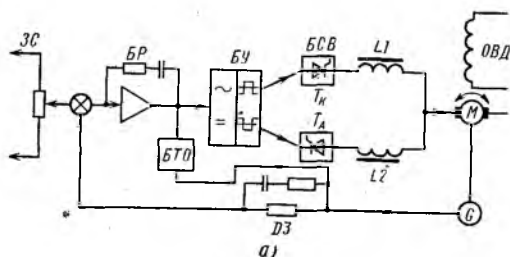
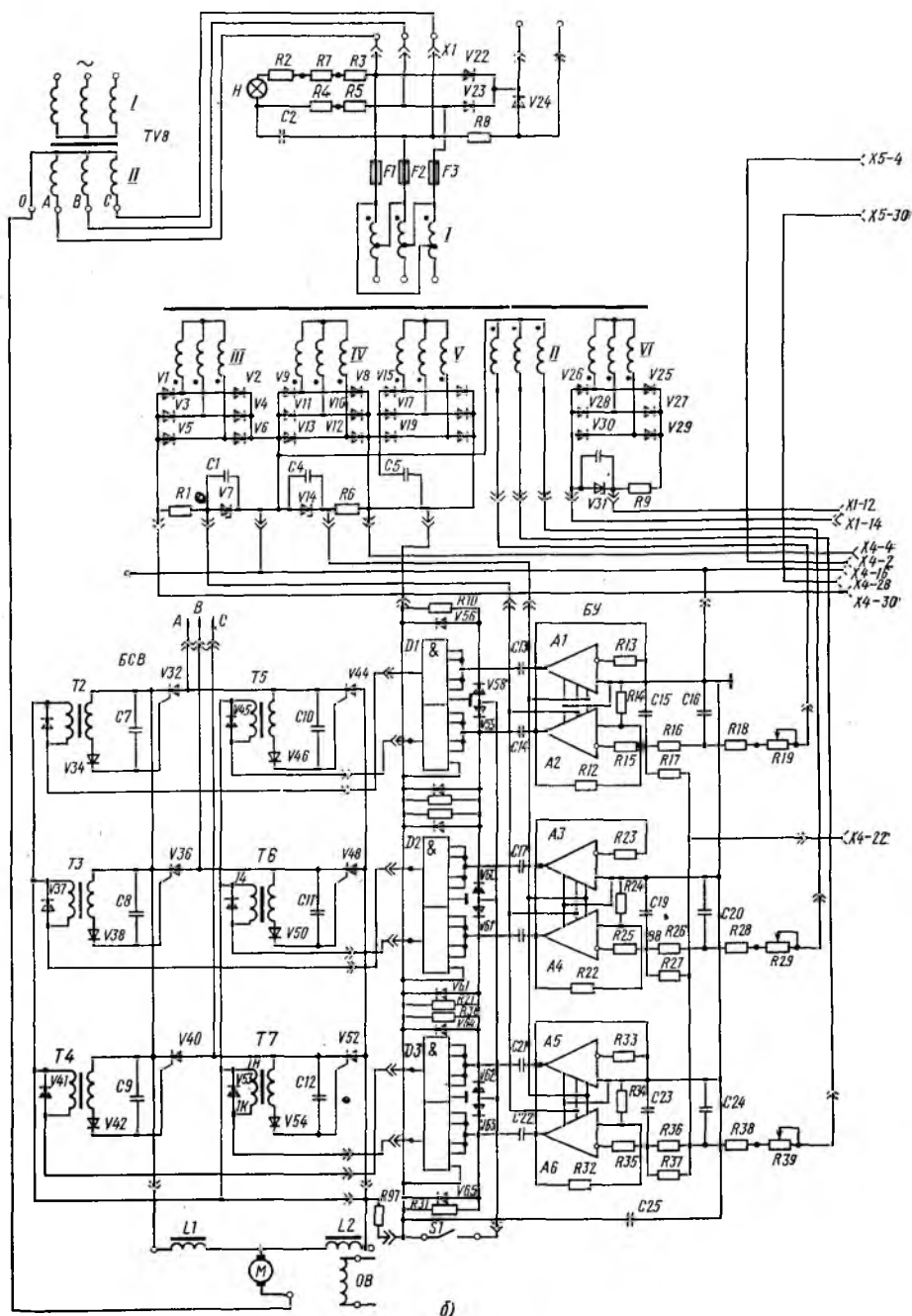
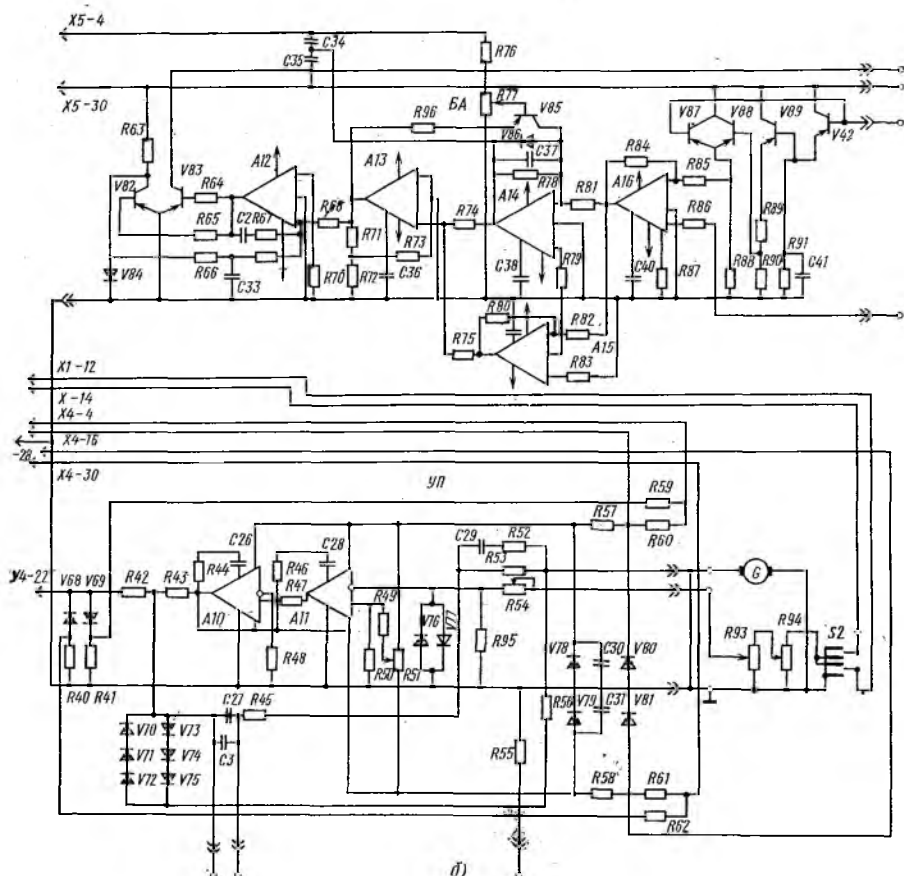


Рис. 40. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы электропривода серии ЭТЗИ



Электродвигатель постоянного тока питается от блока силовых выпрямителей (БСВ). Он содержит две группы тиристоров — анодную  $T_A$  и катодную  $T_K$ . Для управления углом зажигания тиристоров имеется блок управления БУ, формирующий требуемый



угол  $\alpha$ . Блок регулирования БР является одноконтурным с регулятором частоты вращения. На его вход подается разность напряжений датчика скорости ЗС и тахогенератора G. В цепи последнего предусмотрено дифференцирующее звено ДЗ, служащее для улучшения формы пусковых процессов привода. Блок токоограничения имеет индекс БТО. С целью ограничения величины уравнивающих токов включены дроссели L1 и L2.

#### Основные данные электропривода серии ЭТЗИ:

Диапазон регулирования	1:1000
Число типоразмеров	25
Диапазон мощностей, кВт	0,025—2
Серии электродвигателей	ПСТ, ПБСТ, ДК1, ПБВ, 2П, 2ПБВ и др.
Число исполнений преобразователей	2

Принципиальная схема привода дана на рис. 40, б. Силовая часть привода состоит из тириستоров катодной и анодной групп, соединенных встречно-параллельно по трехфазной нулевой схеме. Для получения на якоре двигателя выпрямленного напряжения определенной полярности одна из групп переводится в выпрямительный режим, другая — в инверторный. Тиристоры управляются согласованным способом, который характеризуется наличием уравнивающих токов.

На вход УП поступает два напряжения, разность которых подается через резисторы  $R53$  и  $R54$  на вход первого операционного усилителя  $A11$ . Вход усилителя шунтирован защитными диодами  $V76$  и  $V77$ . Цепи  $R46$ ,  $C28$  и  $R44$ ,  $C25$  служат для предотвращения самовозбуждения усилителей, цепь  $R45$ ,  $C27$  — для коррекции системы регулирования.

Операционный усилитель  $A11$  балансируется потенциометром  $R51$  через делитель напряжения. Рабочая точка усилителя  $A10$  определяется резистором  $R48$ . Для улучшения качества переходных процессов резистор  $R53$  шунтирован цепью  $R52$ ,  $C29$ . Операционные усилители питаются от БП через цепи двойной стабилизации питающего напряжения. УП содержит цепь упреждающего токоограничения, состоящую из резисторов  $R55$ ,  $R56$  и диодов  $V70 \dots V75$ . Резисторы  $R55$  и  $R56$  образуют делитель напряжения тахогенератора  $G$ . К диодам  $V70 \dots V75$  приложено выходное напряжение усилителя  $A10$  и напряжение, идущее от тахогенератора. При пуске и торможении двигателя разность приложенных напряжений превышает пороговое напряжение диодов. Одна из ветвей диодов открывается, шунтируя вход БУ. Силовые тиристоры прикрываются, уменьшая ток нагрузки.

Диоды  $V68$  и  $V69$  и делители напряжения, образованные резисторами  $R40$ ,  $R41$  и  $R59$ ,  $R62$ , предназначены для ограничения выходного напряжения усилителя  $A10$  до величины, допускающей смещение управляющего импульса не более чем на  $60^\circ$ . Если выходное напряжение превышает норму, то диод  $V68$  или  $V69$  открывается, шунтируя выход усилителя  $A10$ .

В БСВ катодную группу представляют тиристоры  $V32$ ,  $V36$ ,  $V40$ , анодную —  $V44$ ,  $V48$  и  $V52$ . Тиристоры отпираются импульсами положительной полярности, подаваемыми на управляющие электроды со вторичных обмоток импульсных трансформаторов  $T2 \dots T7$ . Первичные обмотки импульсных трансформаторов питаются от БУ. Вентили  $V34$ ,  $V38$ ,  $V42$ ,  $V46$ ,  $V50$ ,  $V54$  предназначены для защиты управляющих электродов тиристоров от отрицательных импульсов. Конденсаторы  $C7 \dots C12$  шунтируют входы тиристоров по высокочастотным составляющим помех.

БУ работает по вертикальному принципу сравнения управляющего напряжения постоянного тока и развертывающего синусоидального напряжения. БУ состоит из трех идентичных каналов, каждый из которых формирует импульсы управления катодной и анодной группами тиристоров.

Канал управления состоит из узла суммирования, нуль-органа на операционном усилителе  $A2$ , инвертора  $A1$  и усилителя мощности  $D1$ . На вход каждого канала подаются из БП развертывающие синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$  относительно друг друга. Их амплитуда регулируется переменными резисторами  $R19$ ,  $R29$ ,  $R39$ . Цепи  $R16$ ,  $C15$ ,  $C16$  являются частью фазосдвигающей и помехозащищающей цепи. Они предназначены для установки начального угла управления тиристорами.

На входах ОУ  $A2$ ,  $A4$ ,  $A6$  происходит суммирование синусоид с постоянной составляющей, получаемой с выхода УП. Работа каналов идентична: суммарный сигнал, состоящий из напряжения синусоиды и напряжения постоянной составляющей, с выхода УП подается на вход  $A2$ . В зависимости от величины и знака постоянной составляющей исходного сигнала  $A2$  будет отпираться положительной и отрицательной полуволной напряжения, и на его выходе ширина прямоугольного импульса будет изменяться.

Через диоды  $V58...V63$  замыканием выключателя  $S1$  может быть подано запирающее напряжение для отключения привода. Чтобы получить достаточную крутизну переднего фронта импульсов, резистор  $R12$  охватывает усилитель  $A2$  положительной обратной связью. Обмотка возбуждения двигателя питается от выпрямителя, образованного диодами  $V22$ ,  $V23$ , обратным диодом  $V24$  и резистором  $R8$ . О правильности чередования фаз питающей сети сигнализирует лампа  $H$ , включенная через цепь  $R2—R5$ ,  $C2$ .

Схема привода представляет собой автоматическую замкнутую систему регулирования частоты вращения с обратной отрицательной связью по частоте вращения двигателя. Система, снабженная корректирующим устройством, создает необходимую жесткость механических характеристик двигателя во всем диапазоне частот вращения и обеспечивает устойчивость и требуемое качество переходных процессов.

При увеличении задающего сигнала напряжение  $3C$  превышает напряжение тахогенератора  $G$ , и результирующий ток открывает усилители  $A10$  и  $A11$  (см. рис. 40, б). Усиленный сигнал рассогласования поступает на вход БУ, где перемещает по вертикали синусоиды развертывающих напряжений. Импульсы управления тиристорами сдвигаются так, что уменьшается угол отпирания анодной (катодной) группы и увеличивается выпрямленное напряжение соответствующей группы. Среднее напряжение якоря возрастает, и частота вращения двигателя увеличивается. Напряжение тахогенератора растет, уменьшая сигнал рассогласования, угол зажигания тириستоров анодной (катодной) группы увеличивается, а катодной (анодной) группы уменьшается, двигатель подтормаживается, и все повторяется снова. Таким образом, фактическая частота вращения колеблется около среднего значения, соответствующего заданному. Для устранения автоколебаний служит цепь коррекции  $C27$ ,  $R45$ , охватывающая усилители  $A10$  и  $A11$ .

При увеличении нагрузки двигателя частота его вращения

уменьшается. Сигнал рассогласования на входе УП возрастает, приоткрывая УП и увеличивая постоянную составляющую на входе БУ. Углы управления тиристорами изменяются так, что среднее значение напряжения якоря увеличивается. Частота вращения двигателя возрастает до тех пор, пока сигнал рассогласования на входе системы не достигнет прежней величины. При сбрасывании нагрузки отработка сигнала рассогласования происходит аналогично, но в обратном порядке. Переключатель  $S_2$  в режимах реверса переключают в противоположное положение, знак задающего сигнала меняется на обратный. В первый момент напряжения ЗС и G складываются, что приводит к изменению знака и увеличению сигнала рассогласования. Одна группа тириستоров переводится в инверторный режим, и двигатель передает запасенную энергию в сеть. Происходит быстрое рекуперативное торможение двигателя до полной его остановки, затем разгон в противоположном направлении.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТ6

Электропривод постоянного тока серии ЭТ6 предназначен для регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока в большом диапазоне частот вращения и применяется в качестве привода механизмов подачи. Он состоит из тиристорного преобразователя, электродвигателя со встроенным тахогенератором, силового трансформатора серии ТС, задатчика частоты вращения и токоограничивающих дросселей. Электропривод представляет собою комплектное устройство, выполненное в открытом исполнении и предназначенное для встройки в шкаф. Управляющее устройство и силовой блок преобразователя имеют блочную конструкцию, обеспечивающую оперативную замену блоков и возможность ремонта или замены отдельных элементов.

#### Основные технические данные электропривода ЭТ6:

Напряжение сети, В . . . . .	380+10%
Частота сети, Гц . . . . .	0,6—11,3
Максимальный диапазон регулирования . . . . .	1:10000

Диапазон регулирования определяется максимальной скоростью двигателя, так как минимальная частота вращения двигателя 0,1 об/мин. Электропривод обеспечивает работу во всех четырех квадрантах механической характеристики при изменении управляющего напряжения в пределах  $\pm 10$  В.

На рис. 41, а представлена структурная схема электропривода. Отличительной чертой ее является двухконтурная система подчиненного регулирования с регулятором скорости (РС) и регулятором тока (РТ). Схемой предусмотрено зависимое от скорости токоограничение и такое же ограничение выходного сигнала регулятора тока, поступающего на вход тиристорного преобразователя (ТП). В качестве датчика обратной связи по частоте вращения (ДС) используется тахогенератор, по току (ДТ) — магнитодио-

ды, включенные в цепь якоря двигателя. Последний изображен в виде двух звеньев: инерционного (ИН) и интегрирующего (ИНТ).  $U_3$  — задающее напряжение,  $U_{дс}$  — напряжение датчика скорости,  $U_{рс}$  — выходное напряжение регулятора скорости,  $U_{рт}$  — напряжение регулятора тока,  $U_я$  — напряжение на якоре двигателя. Блоки токоограничения (ТО) и ограничения выходного напряжения (ОГР) вырабатывают сигналы, выдаваемые в систему управления.

На рис. 41, б показана силовая схема электропривода. Напряжение на якоре двигателя  $M$  регулируется с помощью шестимпульсного реверсивного тиристорного преобразователя на 12 тиристорах  $V01 \dots V12$ . Тиристорный преобразователь получает питание от силового трехфазного трансформатора  $TV$ , первичная сторона которого включена в треугольник, силовая вторичная обмотка — в шестифазную звезду и третья — обмотка для питания цепей управления — в звезду. Для ограничения уравнивающих токов между вентилями катодной и анодной групп включены токоограничивающие дроссели  $L1$  и  $L2$ .

Тиристоры выпрямителя управляются импульсами, поступающими от системы формирования управляющих импульсов, состоящей из шести идентичных каналов управления. На схеме (рис. 41, в) полностью изображен лишь один канал управления тиристорами фазы А. Синусоидальное развертывающее напряжение со вторичной обмотки трансформатора  $TV14$  (точка 6), сравнивается с напряжением выхода регулятора тока (точка 19) и подается на вход нуля-органа  $A101$ , выполненного на интегральном операционном усилителе с большим коэффициентом усиления. Моменты времени переключения нуля-органа  $A101$  выделяются дифференцирующей цепочкой  $R105$ ,  $C105$ ,  $C106$ , усиливаются транзисторами  $VT101$  и  $VT102$  и через импульсный трансформатор  $TV02$  поступают на управление тиристором анодной группы, а импульсы, усиленные транзистором  $VT103$ , через импульсный трансформатор  $TV01$  поступают на управление тиристором катодной группы.

Необходимое качество работы электропривода в статике и динамике обеспечивается благодаря двухконтурной структуре электропривода с регулятором тока и частоты вращения. На входе регулятора частоты (рис. 41, г), представляющего собой двухкаскадный усилитель постоянного тока, собранный на микросхемах  $A301$  и  $A302$ , сравниваются сигнал от задатчика скорости (вход 91) и сигнал отрицательной обратной связи по частоте с тахогенератора (вход 90). Разность этих сигналов усиливается и подается на вход регулятора тока ( $A303$ , вход 4), где она сравнивается с сигналом отрицательной обратной связи по току, поступающим с датчика тока. Усилитель  $A302$  служит для компенсации дрейфа нуля усилителя  $A301$ . Датчик тока выполнен на магнитодиодах (включенных в мостовую схему), которые находятся в магнитном поле, создаваемом проводниками, по которым протекает ток якоря, в зависимости от тока магнитодиоды меняют свою проводимость.



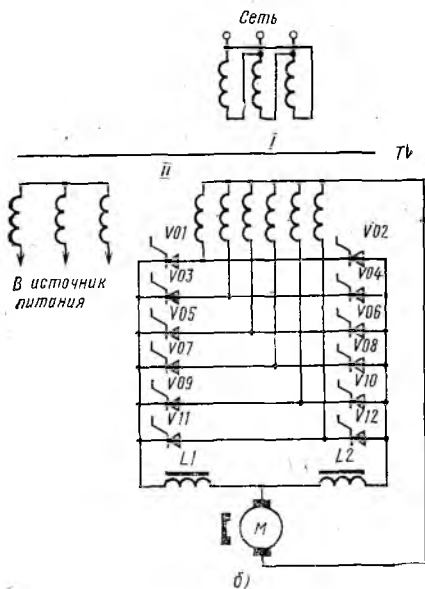
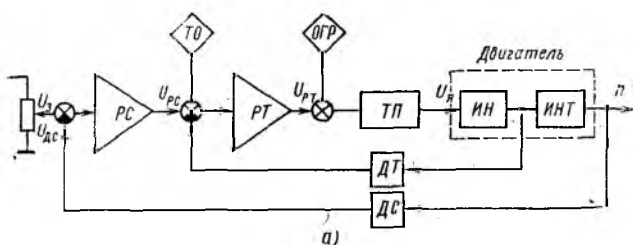
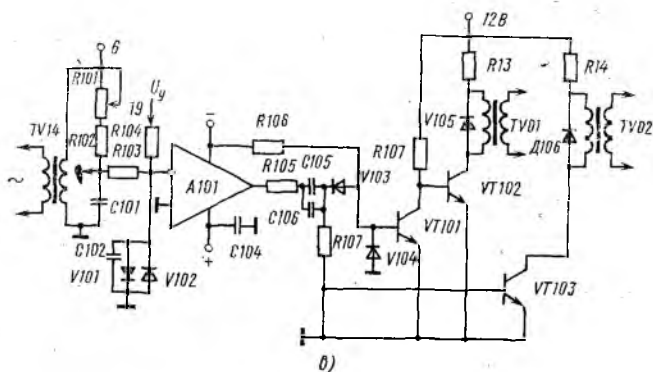
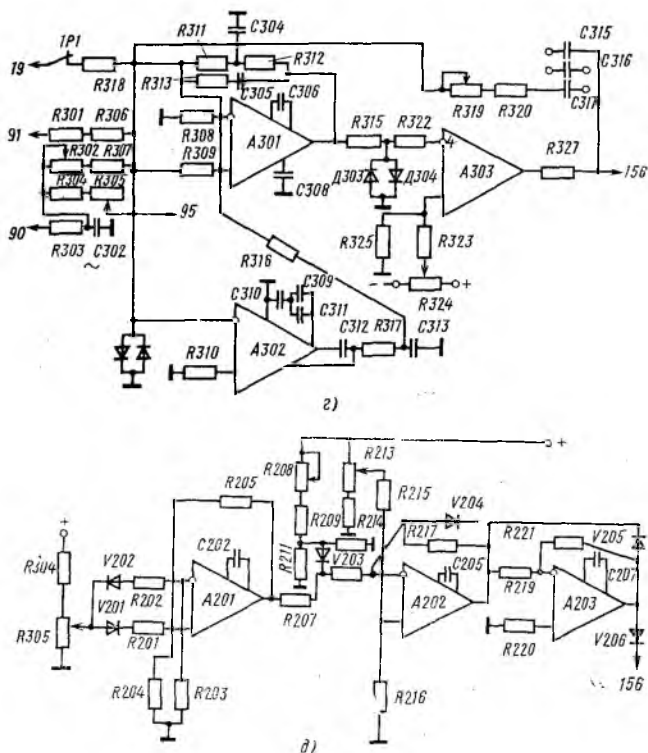


Рис. 41. Схемы привода серии ЭТ6:  
 а — структурная; б — силовая часть;  
 в — СИФУ; г — регулятор частоты вращения; д — токоограничения





Сигнал с выхода регулятора тока подается на вход системы формирования импульсов, управляющих тиристорами преобразователя.

Схема токоограничения (рис. 41, д) собрана на микросхемах A201, A202 и A203. Она обеспечивает зависимое от частоты вращения токоограничение, обусловленное применением высокооментных двигателей серии ПБВ. Элементы коррекции подбираются при наладке. С целью исключения недопустимых токов в цепи якоря при переходных процессах предусмотрена схема, состоящая из операционного усилителя и стабилитрона.

Предусмотрен операционный усилитель, который может быть использован в качестве регулятора положения, для чего входные и выходные цепи усилителя выведены на внешний разъем. Подстройка нуля усилителя осуществляется переменным резистором. Схема управления преобразователем позволяет осуществить защиту электропривода при неправильном чередовании фаз питающей сети, обрыве любой из фаз, при исчезновении стабилизированного напряжения любой полярности, при перегреве электродвигателей. Выходными элементами узла защиты, собранного на транзисторах, являются реле.

Источник питания обеспечивает питание цепей управления постоянным стабилизированным напряжением 12,6 В и собран по схеме двухканального стабилизатора с последовательно включенными регулируемыми транзисторами различной проводимости.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ БУ3609

Этот привод является реверсивным однофазным тиристорным преобразователем с отдельным управлением. Отличительной чертой его является отсутствие силового трансформатора и наличие дросселя в цепи якоря двигателя постоянного тока, повышающего использование двигателя по передаваемому моменту. Структурная схема электропривода приведена на рис. 42. На входе регулятора скорости  $PC$  сравнивается сигнал задания из выхода задатчика скорости  $ЗС$  и сигнал обратной связи  $U_{oc}$  с тахогенератора  $G$ .

Выходной сигнал  $PC$  является задающим для регулятора тока  $PT$ . На входе  $PT$  сравниваются сигнал с  $PC$  и сигнал отрицательной обратной связи  $i_{oc}$  по току, поступающий с датчика тока управляемого выпрямителя. Далее выходной сигнал  $PT$   $U_i$  через нелинейное звено  $HЗ$  поступает на вход системы импульсно-фазового управления ( $СИФУ$ ). Нелинейное звено  $HЗ$  вводится в систему регулирования для компенсации нелинейности внешней характеристики устройства, которая в значительной мере проявляется при переходе из режима непрерывных токов ( $РН$ ) в режим прерывистых токов ( $РПТ$ ). В  $РПТ$ , который является характерным для однофазных преобразователей, имеет место резкое снижение коэффициента усиления преобразователя. Соответственно снижается общий коэффициент усиления всей системы, что приводит к ухудшению характеристик и переходных процессов в системе автоматического регулирования, а при малых токах — к потере устойчивости.

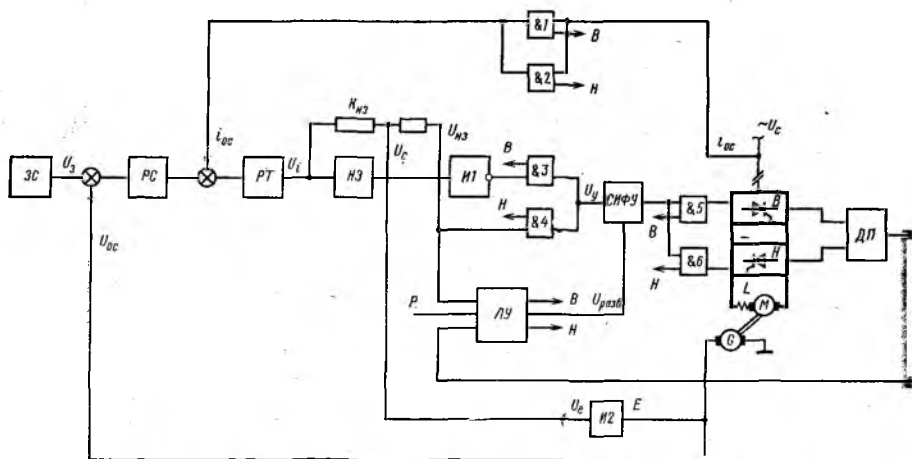


Рис. 42. Структурная схема электропривода серии БУ3609

Поэтому для оптимизации переходных процессов в РПТ необходима корректировка параметров регулятора в функции ЭДС и тока. Выходной сигнал  $HЗ$ , определяющий ток и ЭДС двигателя, поступает в СИФУ. Сигнал  $U_y$  является управляющим для СИФУ и задает угол отпирания  $\alpha$ , определяющий выпрямленное напряжение.

СИФУ является одноканальной и построена по вертикальному принципу управления с линейным опорным (развертывающим) напряжением. Выходные импульсы СИФУ поступают на комплекты тиристоров «Вперед» ( $B$ ) и «Назад» ( $H$ ). В СИФУ предусмотрена возможность получения узких и широких управляющих импульсов, необходимых для применения в силовых схемах выпрямления соответственно с обычными или оптронными тиристорами.

Для осуществления отдельного управления тиристорным преобразователем служит логическое переключающее устройство ЛУ. ЛУ работает в функции выходного сигнала нелинейного звена  $HЗ$ , характеризующего направление вращения, и сигнала блокировки  $U_{бл}$ , характеризующего проводящее состояние тиристоров.

Сигнал блокировки, поступающий с безынерционного датчика проводимости ДП тиристоров, запрещает переключение ЛУ при протекании тока через тиристоры. ДП работает по принципу контроля напряжения на тиристорах катодной и анодной групп. При отсутствии напряжения на тиристорах (проводящее состояние вентилей) запрещается переключение каналов  $B$  и  $H$  и ключей ЛУ.

При изменении полярности сигнала задания  $U_z$ , поступающего на вход  $РС$  с выхода  $ЗС$ , выходные сигналы  $РС$ ,  $РТ$  и  $НЗ$  также реверсируются. Это приводит к отключению тиристоров. При спаде тока, протекавшего по последней перед реверсом группе тиристоров, до нуля ДП дает разрешение на переключение каналов ЛУ. ЛУ переключается в среднее положение (каналы  $B$  и  $H$  выключены) и начинается отсчет бестоковой паузы, необходимой для восстановления запирающих свойств тиристоров. После паузы ЛУ дает разрешающий сигнал на включение другой группы силовых тиристоров. Ток якоря меняет направление. Двигатель тормозится и разгоняется в обратном направлении.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭТУ3601

Электропривод тиристорный, — реверсивный, с отдельным управлением, шестиимпульсной силовой схемой. Диапазон мощностей 0,5—18,5 кВт, ток до 200 А и напряжение до 440 В. Преобразователи имеют три типа исполнения: по выходному току 40, 100 и 200 А и два диапазона регулирования 1:1000 и 1:10000.

Электропривод (рис. 43, а) состоит из регулятора скорости ( $РС$ ), регулятора тока ( $РТ$ ), управляемого выпрямителя ( $УВ$ ), двигателя ( $Д$ ), тахогенератора ( $ТГ$ ), датчика тока ( $ДТ$ ). Регуляторы тока и скорости охвачены цепями коррекции  $R1$ ,  $C1$  и  $R2$ ,  $C2$ . Между регулятором тока и тиристорным выпрямителем имеется нелинейное звено  $HЗ$ , служащее для обеспечения качества регу-

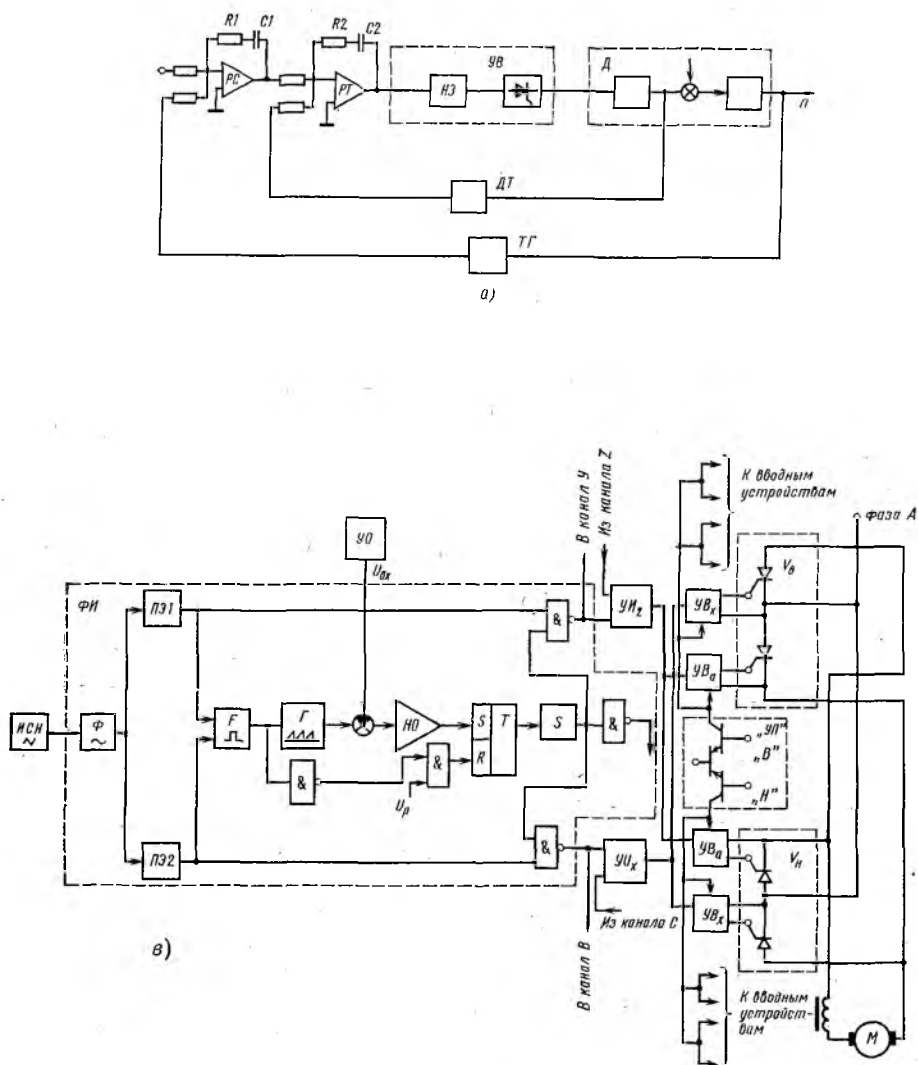
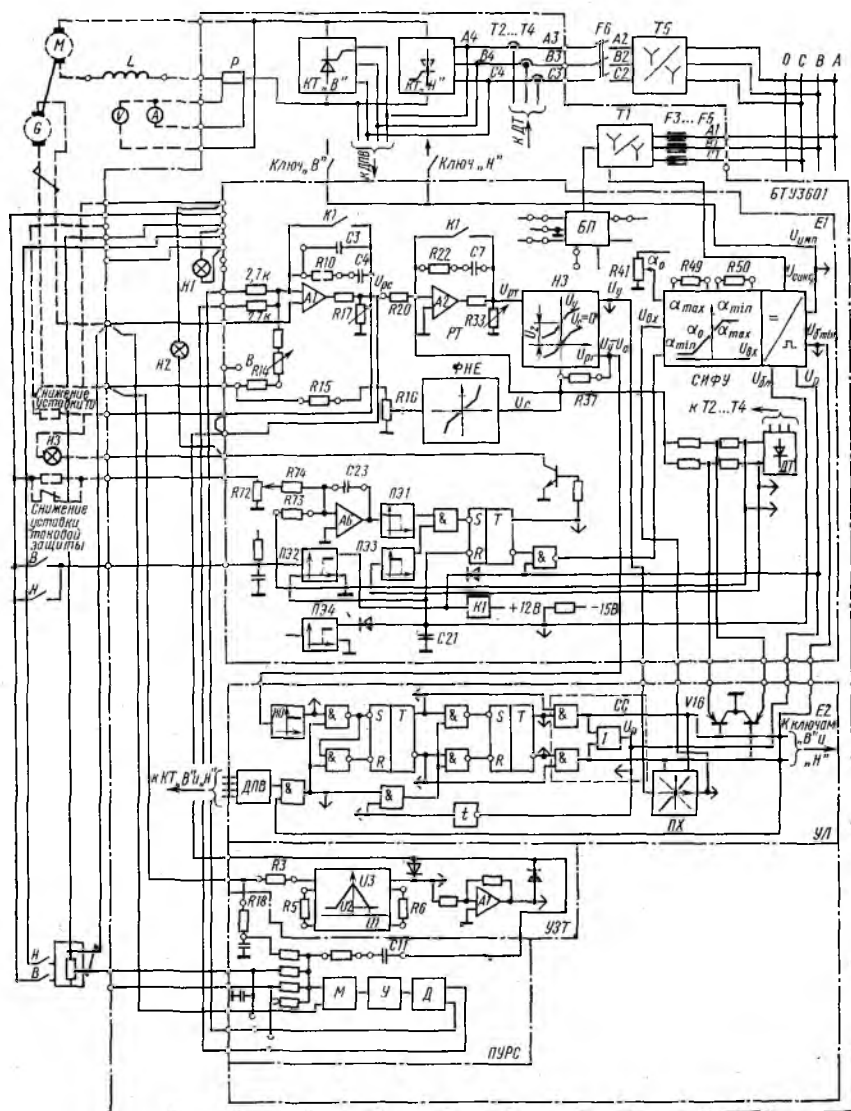


Рис. 43. Схемы привода серии ЭТУ 3601:

а — структурная; б — функциональная схема; в — система управления тиристорами

лирования при переходе из зоны прерывистых в зону непрерывных токов. В схеме отсутствуют уравнивательные реакторы, что обусловлено применением отдельного управления группами тириستоров.

Функциональная схема (рис. 43, б) содержит силовую часть, состоящую из реверсивного трехфазного мостового выпрямителя (КТ «В» и КТ «Н»), подключаемого к сети через согласующий трансформатор  $T5$  и автоматический выключатель  $F6$ . Якорь дви-



б)

гателя  $M$  присоединяется к выпрямителям через сглаживающий дроссель  $L$ .

Система управления — двухконтурная по принципу подчиненного регулирования, размещена на двух печатных платах  $E1$  и  $E2$ . На плате  $E1$  размещены система СИФУ, регуляторы скорости и тока (РС и РТ), функциональный преобразователь ЭДС двигателя (ФПЕ), нелинейное звено (НЗ), блок питания (БП), датчик тока (ДТ), узел защиты и сигнализации.

Плата *E2* имеет две модификации — для диапазонов 1:1000 и 1:10 000. На плате размещены логическое устройство системы раздельного управления группами тиристоров *УЛ* с переключателем характеристик *ПХ* и датчиком проводимости вентилей *ДПВ*, узел зависимого токоограничения *УЗТ*, предварительного усилителя регулятора скорости (*ПУРС*). *ПУРС* в модификации для диапазона 1:1000 отсутствует.

Пропорционально-интегральные регуляторы скорости и тока выполнены на операционных усилителях *A1* и *A2*. Выходной сигнал регулятора скорости является задающим для внутреннего токового контура. Резистор *R17* служит для регулирования степени ограничения максимально возможного тока якоря в переходных режимах и при перегрузках.

Так как в диапазоне 1:10 000 дрейф нуля усилителя скоростного контура должен быть минимален, схемой предусмотрено использование промежуточного усилителя (*ПУРС*), построенного по схеме модулятор — усилитель — демодулятор. Он выполнен на двух инвертирующих усилителях и двух транзисторах. *ПУРС* работает на частоте 2÷3 кГц, вырабатываемой генератором прямоугольных импульсов. Роль цепи коррекции (диапазон 1:10 000) выполняет цепь *R18, C11* (плата *E2*).

Для обеспечения постоянства коэффициента усиления тиристорного выпрямителя в режиме непрерывного и прерывистого тока в канал регулирования введено нелинейное звено (*НЗ*) с характеристикой, обратной регулировочной характеристике в режиме прерывистого тока. Оно выполнено на операционном усилителе, охваченном нелинейной обратной связью.

Переключатель характеристик *ПХ* служит для согласования однополярной регулировочной характеристики *СИФУ* двухполярным сигналом управления *У<sub>у</sub>*. Ограничение углов зажигания тиристоров и установка начального угла зажигания осуществляется усилителем и резистором *R41*. Максимальный угол (150°) выставляется резистором *R49*, минимальный (5—10°) — *R50*.

Зависимое от частоты вращения токоограничение, необходимое при использовании высокомоментных двигателей, осуществляется узлом *УЗТ*, принцип действия которого основан на ограничении выходного напряжения регулятора скорости в зависимости от напряжения тахогенератора. Максимальное выходное напряжение *УЗТ* устанавливается резистором *R6*, минимальное — *R5*. Резистор *R3* определяет крутизну характеристик вход — выход *УЗТ*.

Сигнал обратной связи по току формируется с помощью датчика тока *ДТ*, питающегося от трансформаторов тока *T2, T4*. Реверсирование его обеспечивается транзисторными ключами «Вперед» (*B*) и «Назад» (*H*). *V16*. Подключение выхода *СИФУ* к необходимому комплекту тиристоров осуществляется логическим устройством *УЛ*. Оно же управляет ключами «Вперед» и «Назад».

*УЛ* состоит из нуля-органа (*НО*), триггера *T1* заданного направления тока, триггера *T2* истинного направления тока, схемы

совпадения состояний триггеров (*СС*), элемента отсчета выдержки времени, датчика проводимости вентилей (*ДПВ*).

Работа *УЛ* происходит следующим образом: при изменении знака управляющего напряжения изменяется сигнал на выходе нуль-органа. После достижения током в цепи якоря нулевого значения на выходе датчика проводимости вентилей формируется 1 и триггер *T1* перебрасывается в новое состояние. Схема совпадения *СС* фиксирует несоответствие состояния триггеров. Этим обеспечивается блокировка выдачи управляющих импульсов *СИФУ*, а также запускается элемент отсчета времени. Через 1 мс на его выходе формируется 1 и при отсутствии блокирующего сигнала *ДПВ* триггер *T2* перебрасывается в новое состояние.

Если во время отсчета выдержки времени на вход *НО* не поступает команда на включение в первоначальное положение, то триггер *T1* возвращается в исходное положение, соответствующее триггеру *T2*. При этом мгновенно разрешается выдача управляющих импульсов на соответствующую группу тиристоров.

Датчик проводимости *ДПВ* работает по принципу контроля напряжения на тиристорах и состоит из диодных мостов, оптронов, резисторов и нуль-органа на транзисторах. При наличии напряжения на всех тиристорах входы транзисторов шунтируются, в результате чего они запираются и на выходе *ДПВ* формируется 1.

*СИФУ* состоит из двух идентичных каналов фазосмещения и управляющего органа (*УО*) (рис. 43, в). Каждый из каналов выполнен по принципу одноканального управления двумя противофазными вентилями выпрямительного моста. *СИФУ* включает в себя следующие узлы; источник синхронизирующего напряжения *ИСН*, три формирователя импульсов *ФИ*, управляющего органа *УО*, шести усилителей импульсов *УИ*, 12 вводных устройств.

(*ФИ*) состоит из фильтра (*Ф*), двух пороговых элементов *ПЭ1* и *ПЭ2*, формирователя синхронизирующих импульсов *F*, генератора пилообразного напряжения *Г*, нуль-органа *НО*, триггера *T*, формирователя длительности импульсов *S*.

Работа *СИФУ*: синхронизирующие напряжения из *ИСН* сдвигается фильтром *Ф* на 30°. После *ПЭ1*, *ПЭ2* напряжение имеет форму противофазных прямоугольных импульсов. При сигнале 0 на выходе формирователя импульсов *F* формируется синхроимпульс (сигнал 1), которым осуществляется разряд интегрирующей емкости генератора пилообразного напряжения *Г* до нуля. В момент исчезновения синхроимпульса конденсатор начинает заряжаться и напряжение на выходе *Г* линейно возрастает от 0 до 10 В. Момент превышения напряжения *Г* над управляющим напряжением фиксируется нуль-органом *НО*, который изменяет свое состояние с 1 на 0. При этом триггер *T* переключается и на его выходе формируется 0. Это вызывает появление на выходе *S* управляющего импульса. Импульс приходит на вход одного из усилителей в соответствии с сигналами *ПЭ1* и *ПЭ2*. После *УИ* усиленный импульс поступает на вводное устройство *УВ* комплекта тиристоров «Вперед» или «Назад».



Триггер ( $T$ ) после появления 0 на выходе  $HO$  сохраняет свое состояние до тех пор, пока из  $F$  на другой его вход не поступит синхриимпульс, который подготавливает триггер для выдачи очередного управляющего импульса. Узел защиты обеспечивает максимально-токовую отсечку; защиту от перегрева двигателя при перегрузках; устранение «ползучей» скорости при отключении датчика частоты вращения; защиту от понижения напряжения в питающей сети.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭШИР-1

Эти реверсивные электроприводы построены на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который обеспечивает самое высокое быстродействие. Полоса пропускания этих приводов в 3—5 раз больше, чем у приводов других серий, КПД и коэффициент использования двигателя имеют наилучшие показатели.

Структурная схема электропривода показана на рис. 44. Сигнал рассогласования, образованный разностью напряжений задания и тахогенератора, усиливается в регуляторе частоты вращения ( $PЧВ$ ) и поступает на вход регулятора тока ( $РТ$ ). С его выхода сигнал поступает на входы  $ШИМ1$  и  $ШИМ2$ , осуществляющие модуляцию входного сигнала в зависимости от его знака. С выхода  $ШИМ$ ов биполярный сигнал поступает на вход узлов задержки  $УЗ1 \dots УЗ4$ , а после них — на узлы гальванической развязки  $УГР1 \dots УГР4$  и, наконец, на импульсные усилители  $ИУ1 \dots ИУ4$ . Каждый из четырех каналов  $УЗ$ ,  $УГР$  и  $ИУ$  управляет плечами мо-

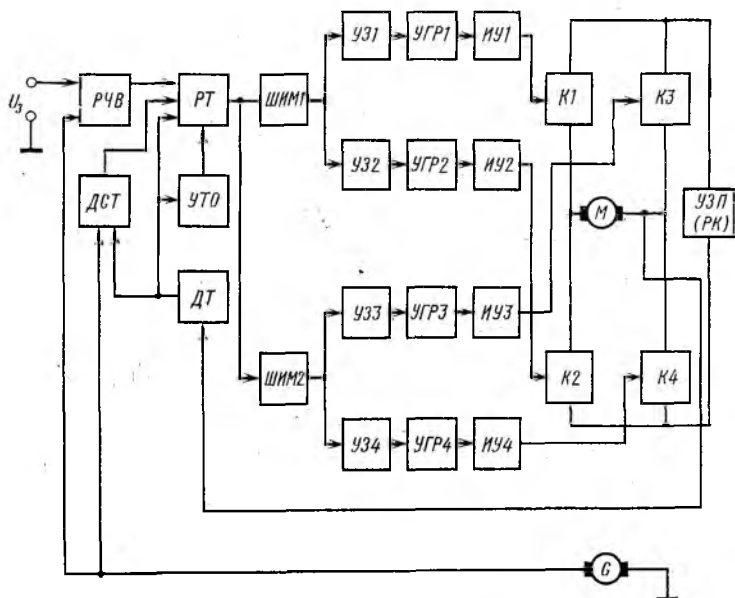


Рис. 44. Структурная схема электропривода серии ЭШИР-1

ста из силовых транзисторных ключей  $K1 \dots K4$ , в диагональ которого включен якорь двигателя постоянного тока  $M$ . При вращении его в одну сторону работают ключи  $K1, K4$ , в противоположную —  $K2, K3$ .

Датчик тока ( $ДТ$ ) формирует сигнал, пропорциональный току якоря. Сигнал с выхода  $ДТ$  поступает на  $РТ$  и устройство токоограничения ( $УТО$ ). На вход  $РТ$  поступает также сигнал от датчика статического тока ( $ДСТ$ ), улучшающего быстродействие привода при работе в области малых скоростей. Устройство защиты от перенапряжений ( $УЗП$ ) служит для защиты транзисторных ключей от недопустимых напряжений при переходных процессах. Кроме этой защиты предусмотрены защиты ключей от перегрузок по мощности, от неуправляемого разгона на максимальную скорость и др.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Развитие производства и применение комплектных электроприводов подач станков привели к широкому использованию привода главного движения, регулируемого как по закону постоянства мощности, так и по закону постоянства момента. Регулируемый электропривод главного движения сначала применяли в станках с приводом небольшой мощности. Например, привод главного движения серийных координатно-расточных станков был укомплектован электромашинным приводом по системе Г-Д мощностью 2 кВт. Затем этот привод был заменен электроприводом со статическим преобразователем на магнитных усилителях типа ПМУ6М-13. Его технические данные: регулирование частоты вращения в обмотке возбуждения с диапазоном 1:4 (2800—7000 об/мин) и напряжения на якоре 1:10. Изменение тока возбуждения осуществлялось регулируемым серводвигателем, меняющим сопротивление в цепи возбуждения.

Затем был разработан и внедрен электропривод главного движения серии ПКВ на кремниевых диодах мощностью до 14 кВт. Частота вращения регулировалась только полем (1:4), были предусмотрены ступенчатый пуск и регулирование тока возбуждения при помощи резистора. Недостаточная надежность и отсутствие зоны регулирования в цепи якоря привели к разработке тиристорного привода главного движения станков серии ПКВТ (регулирование напряжения на якоре с  $D=1 \div 5$  и полем с  $D=1 \div 4$ ). Диапазон мощности 1,4—24 кВт. Особенность привода — наличие одного задатчика частоты вращения на обе зоны регулирования. Переход из одной зоны в другую осуществляется автоматически за счет использования сигнала изменения напряжения на якоре после достижения им номинального значения. Недостаточный диапазон регулирования напряжения в цепи якоря привел к созданию электропривода серии ЭТЗ, у которого диапазон регулирования напряжением якоря достигает  $D=1:100$ , а полем  $D=1:5$ .

В связи с расширением области применения регулируемых приводов главного движения появились новые требования (реверсив-

#### 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Серия	Диапазон регулиро- вания		Диапазон мощно- стей, кВт	Суммарная погрешность частоты вращения, %	Область применения
	напряже- нием в цепи якоря	напряже- нием в обмотке возбуж- дения			
ПМУ6М-13	1:10	1:4	2	25	Координатно-расточные станки
ПКВ	—	1:4	1,5—14	20	Шлифовальные станки
ПКВТ	1:5	1:4	1,5—24	20	Кузнечно-прессовые ма- шины
ЭТЗ	1:100	1:5	1,1—22	20	Координатно-расточные станки
ЭТЗД	1:100	1:5	1,4—14	20	Многооперационные стан- ки
ЭТЗДР	1:100	1:5	1,4—30	25	Станки с ЧПУ
ЭТРП	1:100	до 1:9	1—30	25	То же

ность и отсутствие силового трансформатора), которым отвечают разработанные новые серии электроприводов: ЭТЗД — реверсивный с диапазоном регулирования частоты по якорю  $D=1:100$ , но с силовым трансформатором и ЭТЗДР — реверсивный, бестрансформаторный, с  $D=1:100$ . В табл. 4 приведены основные техниче-ские характеристики электроприводов главного движения.

**Электроприводы серий ЭТЗ и ЭТЗД** комплектные, неререверсивные и предназначены для плавного изменения частоты вращения механизмов главного движения станков и машин. Привод комплектуется двумя полупроводниковыми преобразователями на тиристорах и силовых диодах, обеспечивающих преобразование переменного напряжения сети в регулируемое по напряжению по-стоянного тока для питания цепей якоря и возбуждения электро-двигателя постоянного тока. Кроме того, в комплект привода вхо-дят блок динамического торможения, электродвигатель и задат-чик частоты вращения.

Приводы могут работать в двигательном режиме и режиме ди-намического торможения. Приводы серии ЭТЗ работают в режим-е постоянства предельного момента, серии ЭТЗД — в режимах по-стоянства предельного момента и постоянства предельной мощно-сти. Диапазон мощностей 1,4—14 кВт. Диапазоны регулирования 450—3000 об/мин при предельной мощности и 15—2000 об/мин в режиме предельного момента. Суммарная погрешность привода  $\pm (10 \div 20) \%$  на низкой частоте вращения.

Предусмотрена защита от перегрузки, коротких замыканий и исчезновения напряжения. В качестве усилителя используется и-нтегральная микросхема. Структурная схема привода приведена на рис. 45. Электропривод работает следующим образом. Разность задающего сигнала  $U_z$  и сигнала обратной связи, получаемого от

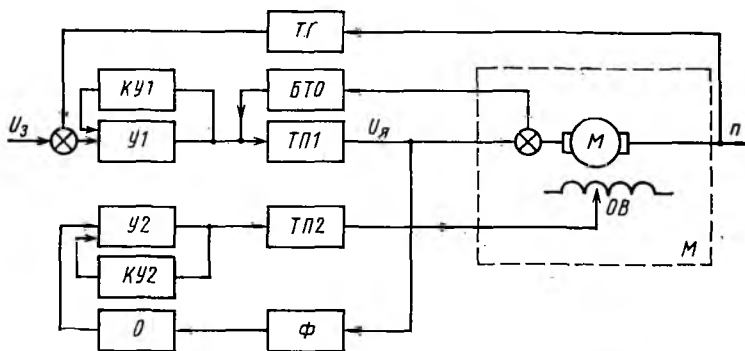


Рис. 45. Структурная схема электропривода серии ЭТЗ

тахогенератора  $TГ$ , подается на усилитель  $У1$ , охваченный цепью коррекции  $КУ1$ . Выходной сигнал  $У1$  подается на тиристорный преобразователь  $ТП1$ , питающий якорь двигателя  $М$ . При достижении номинальной частоты вращения двигателя дальнейший разгон его происходит за счет ослабления поля, т. е. за счет уменьшения тока в обмотке возбуждения  $ОВ$ . Последняя питается от тиристорного выпрямителя  $ТП2$ , управляемого усилителем  $У2$ , который охвачен корректирующей цепью  $КУ2$ . На входе усилителя  $У2$  сигнал на ослабление поля возникает при условии превышения опорного напряжения  $U_я$ , снимаемого с якоря двигателя. Это происходит при превышении двигателем номинальной частоты вращения.

Частота вращения привода задается положением движка задатчика, причем регулирование осуществляется в следующей последовательности: при частотах вращения меньше номинальной — изменением напряжения на якоре, при частотах больше номинальной — уменьшением тока в обмотке возбуждения (серия ЭТЗД). При необходимости задатчик отключают и частоту вращения можно регулировать с помощью другого источника напряжения. Частота вращения двигателя линейно зависит от задающего напряжения. Размеры преобразовательного блока  $484 \times 350 \times 265$  мм, масса 25 кг; размеры блока торможения  $175 \times 120 \times 230$  мм, масса 1,5 кг.

**Электроприводы серии ЭТРП** тиристорный и является двухзонным. В первой зоне частота вращения изменяется за счет напряжения на якоре в диапазоне 1:100, во второй зоне — за счет ослабления поля обмотки возбуждения двигателя в диапазоне до 1:9. Структурная схема электропривода (рис. 46) содержит тиристорный выпрямитель  $ВПЯ$ , собранный по трехфазной мостовой схеме и предназначенный для питания цепи якоря, а также  $ВПП$  — реверсивный тиристорный выпрямитель для питания цепи возбуждения. Канал регулирования напряжения имеет два контура — регулятор скорости  $РС$  и регулятор тока якоря  $РТЯ$ . По достижении двигателем номинальной скорости вращения автоматически начинает уменьшаться ток возбуждения. При изменении полярности задающего напряжения  $\pm 10$  В автоматически

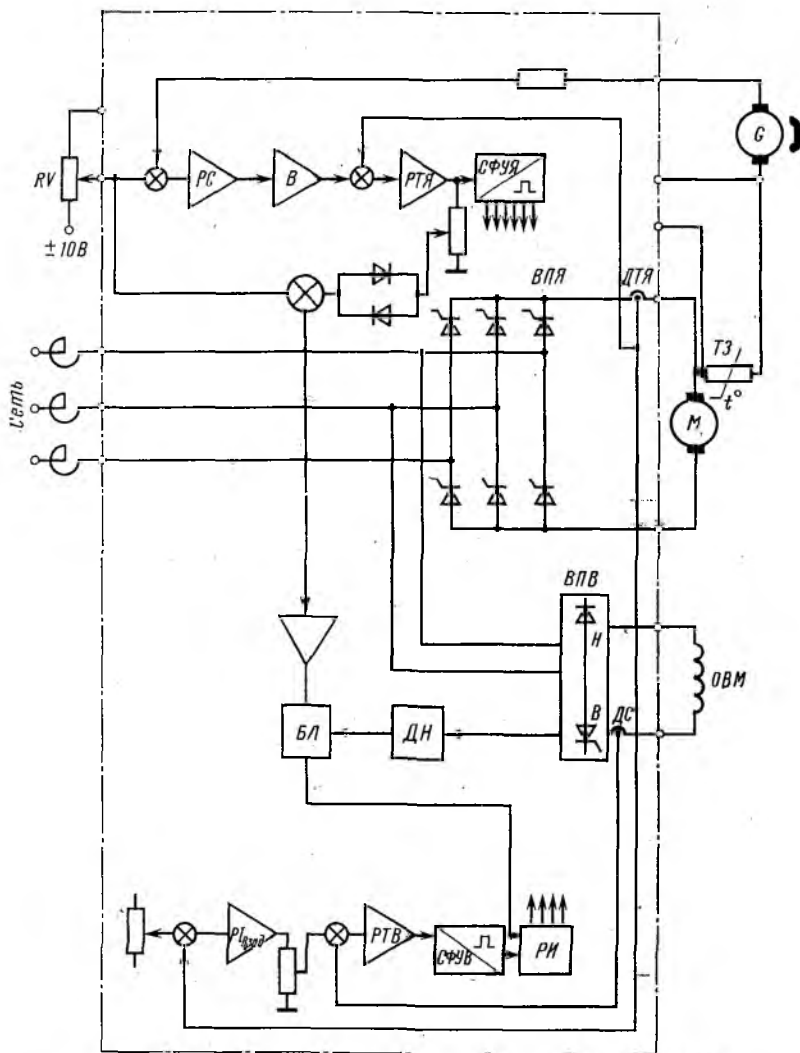


Рис. 46. Структурная схема электропривода серии ЭТРП

изменяется полярность напряжения на обмотке возбуждения и происходит реверс двигателя. СФУЯ и СФУВ — системы фазового управления тиристорами каналов напряжения и возбуждения, БЛ — блок логики, ДТЯ и ДС — датчики тока якоря и цепи обмотки возбуждения, ДН — датчик напряжения.

Реверсивный преобразователь цепи возбуждения ВПВ содержит два комплекта однополупериодных выпрямителей с тиристорами В (вперед) и Н (назад), включенных встречно и работающих по принципу раздельного управления. Раздельное управление осуществляется при помощи блока логики БЛ, обеспечиваю-

щего одновременную работу только одной группы тиристорov. Управление тиристорами ВПВ осуществляется регуляторами заданного значения тока возбуждения ( $PI_{в.зад}$ ) и регулятором истинного его значения (РТВ). Выход последнего управляет системой фазового управления СФУВ и распределителем импульсов (РИ).

В схеме предусмотрена температурная защита двигателя. Обратная связь по скорости осуществляется тахогенератором G. Предусмотрена релейная защита электропривода от неправильного чередования фаз, исчезновения напряжения питания цепей управления, а также отключение электродвигателя и силовой части преобразователя при перегреве. Задание частоты вращения производится потенциометром RV.

**Электропривод ЭТУ3601-Д** состоит из электропривода подачи серии ЭТУ3601 и блока питания цепи возбуждения БУ3509В. Последний представляет собою тиристорный преобразователь, преобразующий переменный ток неизменяемого напряжения в регулируемое напряжение постоянного тока. Нагрузкой этого преобразователя является обмотка возбуждения двигателя постоянного тока, что позволяет изменять его частоту вращения в двух зонах — до номинальной частоты вращения якорь двигателя питается от преобразователя серии ЭТУ3601. При напряжении на якоре выше номинального, за счет ослабления поля, производимого от БУ3509В, двигатель переходит в другую зону регулирования частоты. Переход из одной зоны в другую осуществляется автоматически. С этой целью сравнивается опорное значение напряжения с напряжением противо-ЭДС. После достижения двигателем номинальной частоты вращения опорное напряжение оказывается меньше противо-ЭДС и автоматически начинается ослабление поля. Реверс двигателя осуществляется за счет изменения знака напряжения на его якоре.

**К электроприводам серии ЭТА** относится разработанная серия автономных (следящих) электроприводов под названием ЭТИ (электропривод тиристорный автономный). Основным свойством этого привода является возможность точной отработки заданного угла поворота вала двигателя. С этой целью двигатель снабжен как тахогенератором, так и датчиком положения. Последний построен на принципе фотоэффекта, обеспечивающего преобразование светового потока в электрический сигнал. Вот как устроен фотоимпульсный датчик положения вала двигателя (рис. 47, а). На валу двигателя жестко зафиксирован диск со щелями. Если на эти щели направить световой поток от светодиода, а с другой стороны диска поставить фотоэлемент, то при вращении диска фототок будет периодически прерываться. В результате формируется последовательный ряд импульсов тока, число которых пропорционально углу поворота диска, а частота импульсов в единицу времени определяет скорость его вращения.

Если создать задающее устройство, выдающее команду в виде «пакета», например, из 1000 импульсов, которые после соответствующих преобразований начнут вращать двигатель, то, как

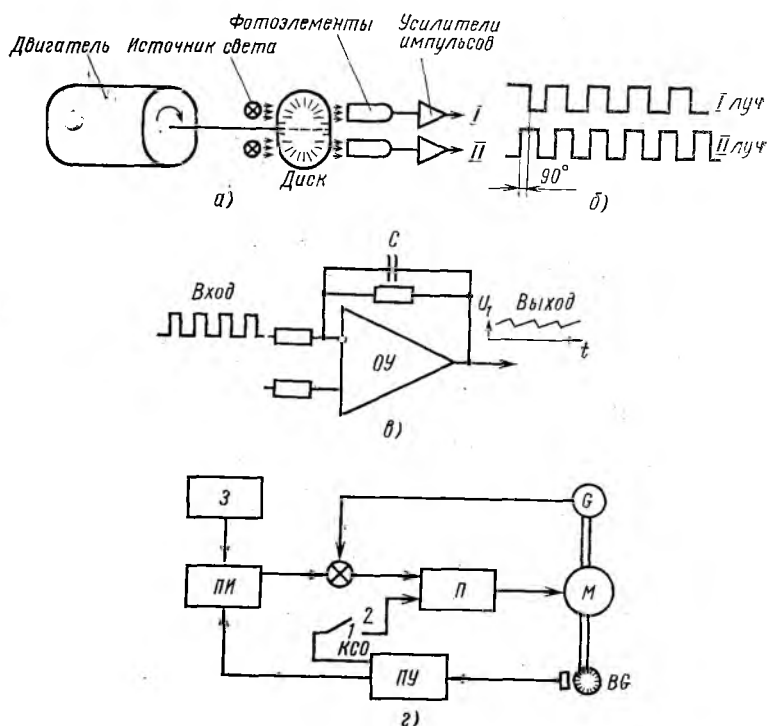


Рис. 47. Электропривод серии ЭТА:

*а* — устройство фотопульсного датчика; *б* — умножение числа импульсов на четыре  
*в* — интегратор; *г* — структурная схема

только двигатель придет во вращение, фотоимпульсный датчик начнет «возвращать» импульсы в систему управления. При равенстве импульсов задания и импульсов обратной связи двигатель остановится. Так мы получили режим позиционирования — вал двигателя остановился в заданной позиции, он как бы «отработал» 1000 импульсов.

Рассмотрим вопрос о точности позиционирования. Нетрудно прийти к выводу, что чем больше число щелей в диске датчика тем меньше может быть задаваемый угол поворота вала двигателя. Допустим, на диске имеется 250 щелей. Расстояние между щелями (в градусах) составит  $360^\circ : 250 = 1,4^\circ$ . Эту величину называют дискретой. Дискрета — это минимальная величина угла поворота вала двигателя, который он может отработать при данном датчике положения.

Чем меньше дискрета, тем выше точность. Покажем способ учетверения числа импульсов при наличии тех же 250 щелей на диске фотодатчика. Если вместо одного фотодиода установить два и расположить их так, чтобы два потока импульсов были сдвинуты друг относительно друга на  $90^\circ$  (рис. 47, б), можно заметить, что при пересечении щелью диска двух фотодиодов формируются

два ряда импульсов, имеющих четыре фронта, — два передних и два задних. Эти фронты суммируются в один поток импульсов таким образом, что на одну щель уже приходится четыре импульса. В результате за один оборот двигателя тот же датчик выдаст не 250, а 1000 импульсов. Дискрета теперь уменьшилась в 4 раза и составляет  $360^\circ : 1000 = 0,36^\circ$  или ( $\approx 20'$ ). Аналогичным способом можно получить еще более мелкую дискрету и достигнуть еще более высокой точности.

Попробуем разобраться, как работает привод с фотоимпульсным датчиком положения. Вспомним, что у привода скорость вращения двигателя зависит от задающего напряжения. Величина задающего напряжения  $\pm 10$  В, т. е. для получения номинальной частоты вращения двигателя  $n_n$  требуется 10 В. Знаки  $\pm$  соответствуют направлению вращения, т. е. плюс означает вращение, например, по часовой стрелке, минус — противоположное.

Если преобразовать импульсы задания и обратной связи в задающее напряжение, которое вначале растет, а при равенстве импульсов задания и датчика обратной связи становится равным нулю, то частота вращения двигателя будет меняться по тому же закону — двигатель разгонится и остановится в заданном положении. Остается понять принцип действия преобразователя импульс — напряжение. В самом простом виде этот преобразователь представляет собою ОУ (рис. 47, в), вход и выход которого соединены через конденсатор С. При подаче на вход ОУ импульса усилитель отпирается его передним фронтом и запирается задним фронтом. В этих условиях конденсатор периодически заряжается и разряжается, накапливая и отдавая электрическую энергию. Благодаря этому на выходе ОУ формируется аналоговое напряжение, величина которого пропорциональна частоте следования импульсов. ОУ, работающий в этом режиме, называется интегратором. Можно сделать вывод, что добавление к приводу фотоимпульсного датчика приводит к появлению нового свойства привода — осуществлять позиционирование.

Этим не исчерпываются новые свойства привода. Оказывается, при условии непрерывной подачи импульсов он может работать в следящем режиме. Мы видим, что в названии режима есть слово «слежение». Наиболее понятен этот режим при рассмотрении станков с ЧПУ при контурной обработке. В этом случае привод подачи «следит» за программой, которая выдается устройством ЧПУ. Очевидно, при слежении всегда есть некоторое отставание как по скорости, так и по пути фактического движения от заданного (по программе) движения. Чем отставание меньше, тем качественнее (добротнее) следящий электропривод. В связи с этим для количественной оценки качества следящего электропривода введено понятие добротности. Коэффициент добротности обозначим буквой  $\sigma$ . Для его определения пригодна упрощенная формула,  $\text{с}^{-1}$ ,  $\sigma \approx 6n/\varphi$ , где  $n$  — частота вращения, об/мин;  $\varphi$  — угол отставания,  $^\circ$ , 6 — число, имеющее размерность  $\frac{\text{мин} \cdot ^\circ}{\text{об/с}}$ .



Например, при частоте вращения двигателя 500 об/мин и угле отставания  $\varphi = 90^\circ$   $\sigma = \frac{6 \cdot 500}{90} \approx 32 \text{ с}^{-1}$ . В станках с ЧПУ  $\sigma$  находится в пределах  $20 \div 40 \text{ с}^{-1}$ . С целью улучшения  $\varphi$  применяют компенсацию скоростной ошибки (КСО). Смысл ее состоит в автоматическом добавлении к основному напряжению задания напряжения КСО, которое пропорционально заданной скорости.

Электропривод серии ЭТА состоит из аналоговой части — электропривода серии ЭТЗИ и цифровой части — преобразователя импульс — аналог в качестве задающего сигнала. Привод обеспечивает работу в качестве регулятора положения в режиме позиционирования и в следящем режиме. С этой целью комплект привода серии ЭТЗИ дополнен двумя печатными платами (интегратором ПИ), усилителем ПУ и фотоимпульсным датчиком (ФИД), расположенным на валу двигателя.

Структурная схема привода (рис. 47, з) содержит преобразователь  $P$  серии ЭТЗИ, двигатель  $M$ , тахогенератор  $G$ , импульсный задатчик пути и частоты вращения  $З$ , преобразователь импульсов  $ПИ$ , датчик положения  $BG$ , преобразователь сигналов обратной связи  $ПУ$ , канал компенсации скоростной ошибки  $КСО$  с переключателем, имеющим два положения: первый — в следящем режиме второй — в режиме позиционирования.

Узлы  $P$ ,  $M$  и  $G$  соответствуют традиционному аналоговому электроприводу с обратной связью по частоте вращения. В качестве цифровой задающей части автономного привода служит управляющее устройство  $З$ , на выходе которого формируются командные импульсы. Этим устройством может быть устройство ЧПУ или любая другая система с импульсным выходом в вид унитарного кода. В узле  $ПИ$  происходит вычитание импульсов обратной связи из командных импульсов (образование сдвига фаз, пропорционального этой разности) и превращение фазового сдвига в аналоговый сигнал, поступающий на вход узла  $P$ .

Канал компенсации скоростной ошибки ( $КСО$ ) работает только в следящем режиме (положение переключки 1). В режиме позиционирования (2) этот канал не работает. Ниже приведено описание работы отдельных блоков цифровой части привода серии ЭТА.

В зависимости от требуемого направления вращения двигателя импульсы задания в виде унитарного кода (импульсы идут последовательно с разной частотой) поступают на один из инверсных входов элемента  $D7$  (рис. 48, а). С выхода 6 элемента  $D7$  импульсы поступают на двухступенчатый триггер  $D8$ , где происходит синхронизация импульсов частотами 1000 и 2000 кГц и их формирование. На выходе 9  $D8$  образуется один узкий импульс, подаваемый на входы  $D16$  (1 и 4). На рис. 48, б показана тактограмма преобразований импульсов.

Фотоимпульсный датчик имеет два светодиода. Пересечение светового потока щелевым диском ( $N=250$ ) создает два потока импульсов, сдвинутых один относительно другого на  $90^\circ$ . Отста-

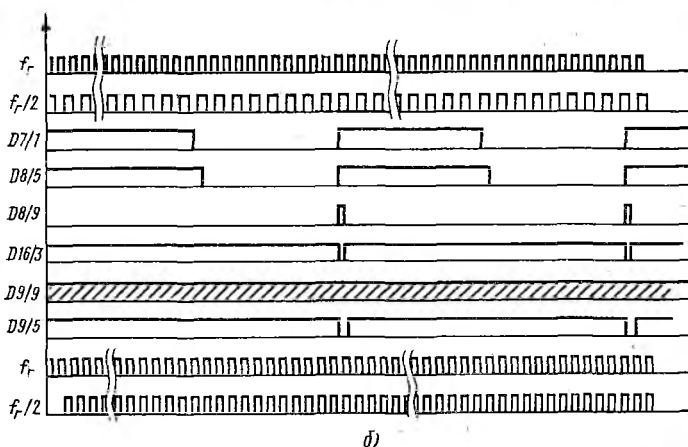
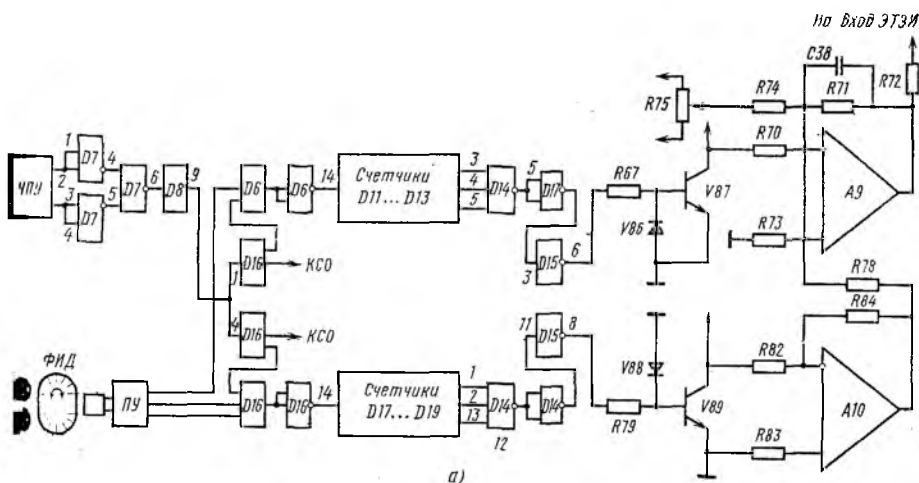
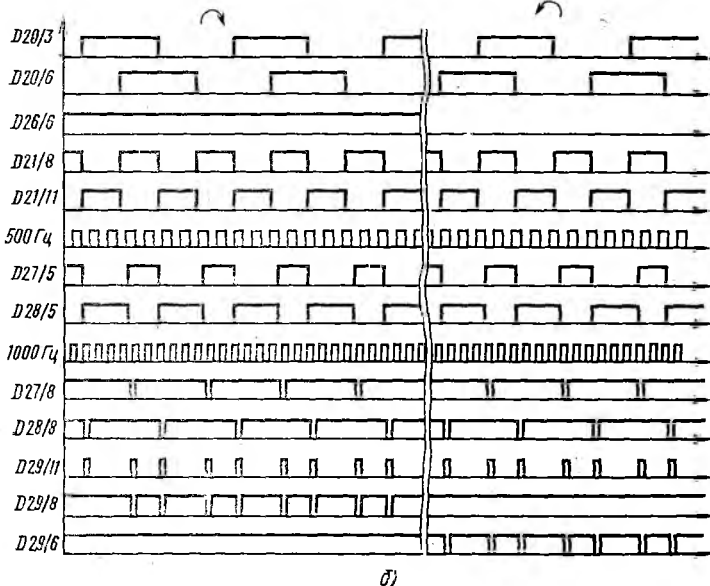
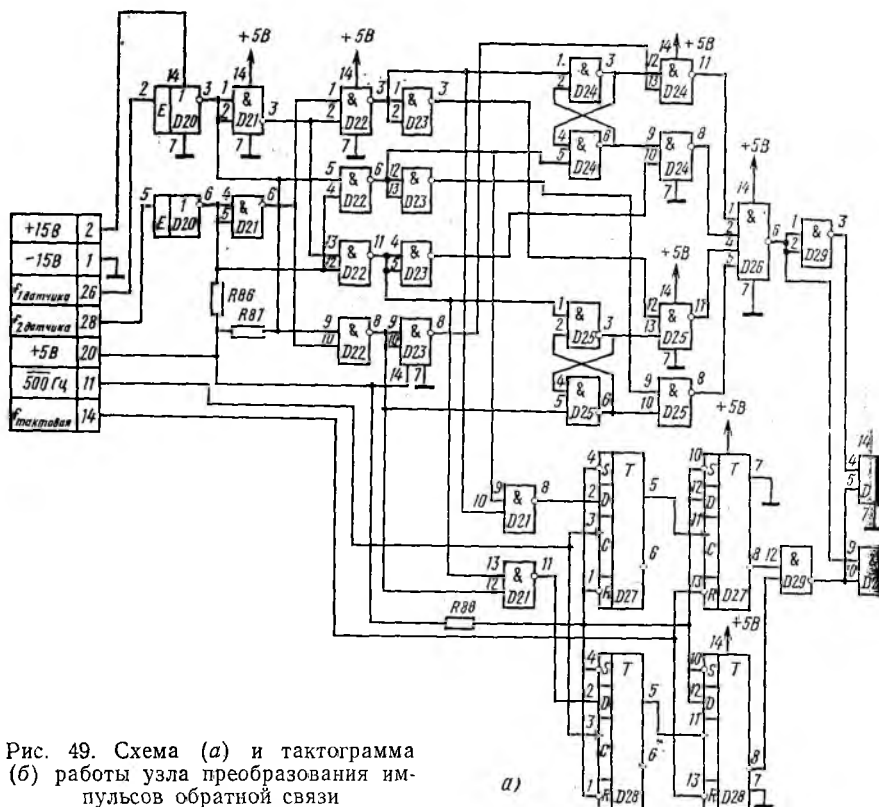


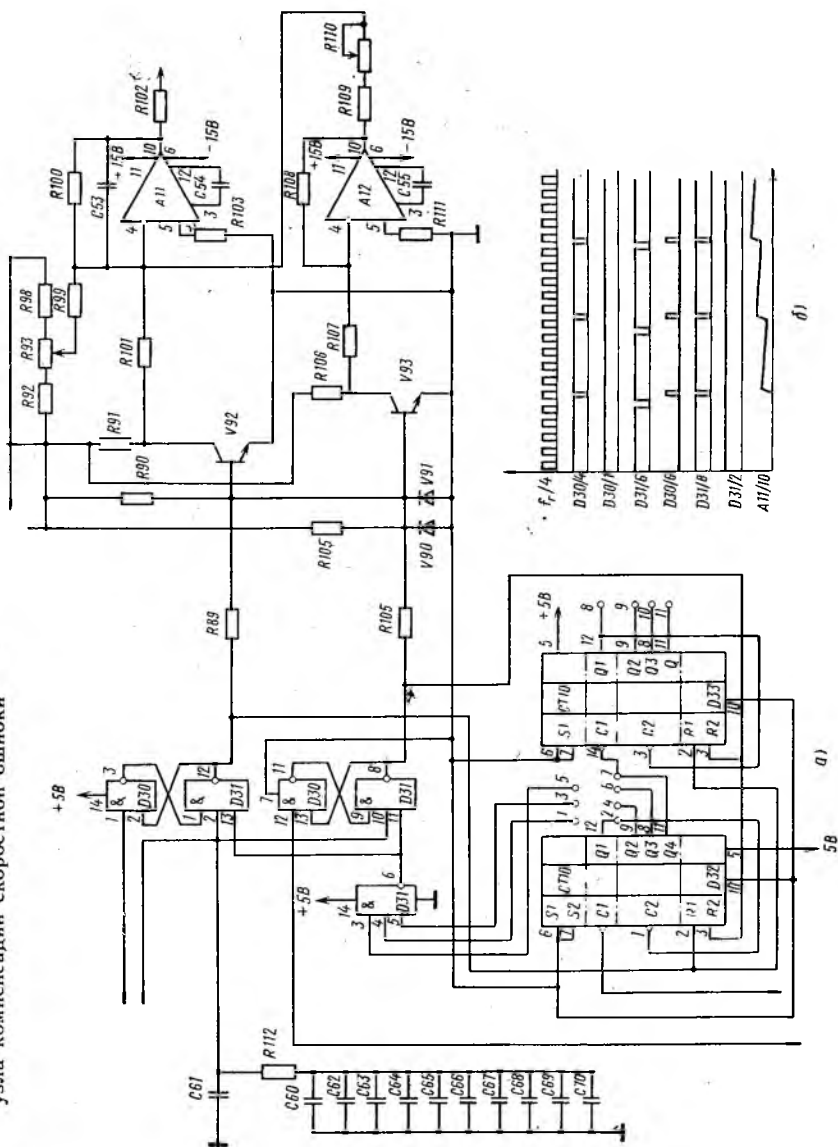
Рис. 48. Схема (а) и тактограмма (б) работы узла преобразования импульсов задания

вание или опережение импульсов одного канала относительно импульсов другого зависит от направления вращения двигателя.

Блок обработки импульсов обратной связи состоит (рис. 49, а) из двух частей: формирования импульсов и определения направления вращения. Формирование импульсов заключается в их учетверении, синхронизации частотой 1000 кГц и тактировании частотой 2000 кГц. Последовательность преобразования импульсов: после снижения уровня импульсов фотодатчиков (ФИД) в D20/2 и D20/5 (число в знаменателе — номер контакта элемента) и инвертирования (D21/3 и D21/6), учетверяются в D22, D23, D21/8, D21/11 (путем выделения передних и задних фронтов, импульсов датчика). Сформированные в триггерах D27, D28 импульсы через D29/11 поступают на входы D29/5 и D29/10.



Прис. 50. Гора (а) и разломы (б) горы



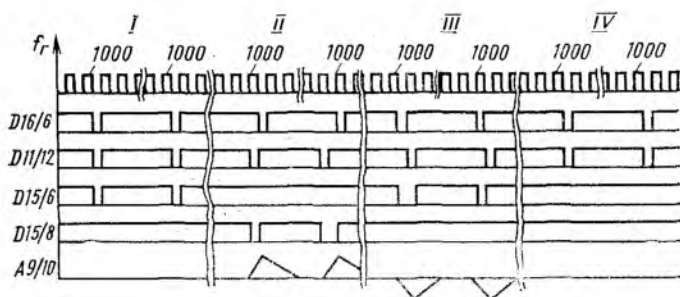


Рис. 51. Тактограмма работы дискриминатора

счетчиков  $D11$  и  $D17$ . Через каждые 1000 импульсов на выходах 6 и 12  $D14$  возникает «нулевой» сигнал с частотой 1000 кГц. Они инвертируются в  $D7$ ,  $D14$  и подаются на триггеры  $D15$ . На выходах 6, 8  $D15$  имеется 1,  $V87$  и  $V89$  открыты и на выходе  $A9$  напряжение равно нулю (колонка I на рис. 51). Идентично, при совпадении по времени импульсов задания с импульсами обратной связи на  $D15/6$  и  $D15/8$  также устанавливаются сигналы единичного уровня.  $V87$  и  $V89$  открыты и на выходе  $A9$  напряжение равно нулю (колонка IV).

Если импульсы задания присутствуют (колонки II и III), то при наличии импульсов задания образуется фазовый сдвиг. Это происходит за счет вычитания импульсов задания и обратной связи из тактирующих импульсов, следующих с частотой 1 мГц. Если на  $D15/3$  (см. рис. 48, а) «тысячные» импульсы поступают раньше, чем на  $D15/11$ , то на выходе 8  $D15$  появляется импульс нулевого уровня, на выходе 6  $D15$  — единичного.  $V87$  закрывается и на выходе интегратора  $A9$  появляется постоянное напряжение, величина которого пропорциональна фазовому сдвигу. Если «тысячные» импульсы раньше поступают на  $D15/11$  — сигнал проходит уже по каналу  $V89$ ,  $A10$  и попадает на  $A9$ . На вход ЭТЗИ поступит задающее напряжение, знак которого противоположен рассмотренному выше случаю. Двигатель будет вращаться в противоположную сторону.

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕРИЙ

Выпускают серийные электроприводы с асинхронными двигателями, реализующие следующие способы регулирования частоты вращения: ПМС и ПМСМ с муфтой скольжения; ТСУ-Р с изменением напряжения статора; ТПЧ, ЭКТ, Размер 2М-5-2 с частотным регулированием частоты вращения.

Определение направления вращения осуществляется в зависимости от того, с какого канала датчика положения первым приходит импульс обратной связи. Например, при движении вперед (рис. 49, б, слева — направо) первым появляется импульс канала  $f_1$  и на выходе  $D26/6$  появляется 1. При этом на  $D29/3 = 0$ . Если первым будет импульс  $f_2$ , то на выходе  $D26/6$  будет 0, а на  $D28/3 = 1$ .

Узел КСО при работе в следящем режиме предназначен для преобразования сигнала задания в импульсной форме в аналоговый сигнал, пропорциональный скорости слежения. Этот сигнал подается на вход усилителя скоростного контура ЭТЗИ для компенсации величины рассогласования между заданной частотой вращения и фактической ее величиной. С ростом частоты вращения эта ошибка возрастает и сигнал КСО также должен соответственно возрастать. Узел работает в обоих направлениях. Он состоит (рис. 50, а) из логических микросхем  $D30...D33$  и узла интегрирования ( $V92, V93, A11$  и  $A12$ ).

С целью снижения пульсаций в выходном напряжении интегратора импульсы задания расширяются с помощью схемы совпадения  $D31$  и счетчиков  $D32$  и  $D33$ , заполняемых импульсами частотой 500 кГц. Для этого между выходами  $D32, D33, D31/3, 4, 5$  устанавливаются перемычки. Диаграмма преобразования импульсов приведена на рис. 50, б.

Работа привода «Вперед»: при включении привода на  $D31/12$  и  $D31/8$  по 1 (цепь  $R112, C61$ ). Транзисторы  $V92, V93$  открыты, на выходе  $A11/10$  нулевое напряжение. Сформированные в ПИ на  $D30/1 = 1$ , а на  $D30/12 = 0$ .  $V93$  закрывается,  $C53$  начинает заряжаться (рис. 50, б). Счетчики  $D32, D33$  работают в режиме «Сложения до заданного кода», обусловленном положением перемычек на входах схемы совпадения  $D30/3, 4, 5$ . В момент совпадения на  $D31/6 = 0$ , на  $D31/8 = 1$ .  $V93$  открывается и  $C53$  начинает разряжаться. Выходное напряжение  $A11/10$  показано на рис. 50, б.

В режиме «Назад» наоборот —  $V93$  открыт, а  $V92$  закрывается с частотой импульсов задания. Усилитель  $A12$  служит для интегрирования выходного напряжения. В режиме позиционирования КСО отключается путем установки перемычки.

Обработка сигналов рассогласования производится следующим образом. На выходе двух каналов, состоящих из счетчиков (см. рис. 48)  $D11...D13$  и  $D17...D19$ , включен фазовый дискриминатор ( $D14, D7, D15$ ), который измеряет фазовый сдвиг сигнала одного канала относительно другого (после соответствующего переполнения счетчиков). Минимальная величина сдвига 0,5 мкс, максимальная — 0,5 мс (исходя из частоты тактирования 2 МГц).

Возможны два случая работы дискриминатора: импульсы задания отсутствуют (или совпадают с импульсами обратной связи) и существуют. Рассмотрим случай, когда импульсы задания отсутствуют или совпадают с импульсами обратной связи (см. рис. 49). Сигналы тактирования частотой 2 МГц подаются на входы 14

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ПМС И ПМСМ

Если между двигателем переменного тока и рабочим механизмом установить электромагнитную муфту (рис. 52), то такое устройство может обеспечить плавное изменение частоты вращения механизма. Муфта может только уменьшать частоту вращения. Как же это происходит? Как и любая муфта, она состоит из двух основных частей: ведущей 1 и ведомой 2. Ведущая часть (якорь) соединена с валом двигателя и имеет неизменную скорость вращения, равную номинальному значению частоты вращения двигателя. Конструктивно она выполнена в виде стального цилиндра с толстыми стенками. Внутри цилиндра расположена ведомая часть — зубчатый индуктор, представляющий собою магнитную систему с кольцевой катушкой возбуждения 3. Питание катушки постоянным током катушки обеспечивается скользящим токоподводом 4, состоящим из щеток и токоведущих колец.

Возбуждаемый постоянным током катушки магнитный поток создает круговое магнитное поле, вызывающее электромагнитное «сцепление» ведомой и ведущей частей муфты. В зависимости от тока возбуждения степень сцепления или частота вращения ведомой части изменяется от нуля до максимума. Для оценки частоты вращения ведомой части введено понятие скольжения  $s = (n_d - n)/n_d$ , где  $n_d$  — частота вращения двигателя;  $n$  — частота вращения вала ведомой части муфты. Величина  $s$  характеризует снижение частоты вращения ведомой части муфты относительно ведущей. Скольжение муфты зависит от тока возбуждения и момента нагрузки, что дает возможность на входном валу муфты при постоянном моменте нагрузки получить плавное изменение частоты вращения соответствующим изменением тока возбуждения. При увеличении момента нагрузки и неизменном токе возбуждения частота вращения ведомой части муфты падает. При этом увеличивается скольжение и величина индуктированной в ведущей части муфты ЭДС, что приводит к росту момента муфты. Новое равновесие момента муфты и момента нагрузки наступает при более низкой частоте вращения. Следовательно, механические характеристики муфты значительно зависят от нагрузки. Повышение жесткости механических характеристик достигается при-

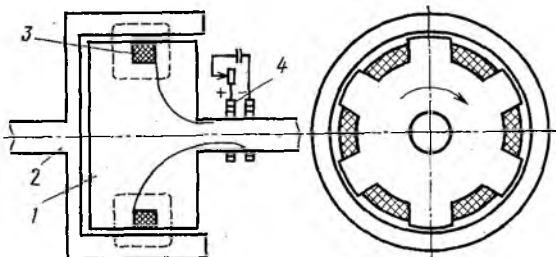


Рис. 52. Электромагнитная муфта скольжения:

1 — ведущая часть; 2 — ведомая часть; 3 — катушка возбуждения; 4 — токоподвод

менением различных устройств для автоматического изменения тока возбуждения.

**Энергетические характеристики муфты скольжения.** Как и в любом устройстве, где изменение скорости осуществляется за счет изменения скольжения, в муфте имеются потери на скольжение, оказывающие влияние на ее параметры. Возникновение потерь на скольжение можно объяснить следующим образом. Рабочие диаметры ведущей и ведомой частей муфт можно считать одинаковыми, а передаточное отношение приблизительно равно единице. Ведущая и ведомая части муфты передают один и тот же момент, однако за счет разности скоростей вращения мощности передаваемые обеими частями муфты неодинаковы. Если при одном и том же моменте мощность (кВт) ведущей части составляет  $P_{\text{вед}} = M n_{\text{дв}} / 975$ , то мощность ведомой части  $P_{\text{ведом}} = M n_{\text{вед}} / 975$ . Величину  $P_{\text{вед}}$  можно выразить через скольжение:  $P_{\text{вед}} = M n_{\text{дв}} (1 - s) / 975$ .

Разность между передаваемыми мощностями обеих частей муфты  $P_{\text{вед}} - P_{\text{ведом}} = M n_{\text{дв}} s / 975$ . Очевидно, эта разность и является мощностью потерь на скольжение. Мощность потерь расходуется на нагрев активной поверхности якоря. Нагрев якоря быстро растет с увеличением скольжения благодаря росту тепловых потерь. Действительно, при увеличении скольжения увеличивается наводная в якоре ЭДС, что вызывает увеличение вихревых токов. Кроме того, благодаря действию поверхностного эффекта с увеличением скольжения увеличивается активное сопротивление якоря. В результате потери, пропорциональные  $I_a^2 R_a$ , резко возрастают, вызывая увеличение нагрева якоря.

Идеальный КПД муфты  $\eta_m = \frac{P_{\text{ведом}}}{P_{\text{вед}}} = 1 - s$ . С учетом КПД двигателя  $\eta_m = \eta_{\text{дв}} (1 - s)$ .

Полученное выражение показывает, что КПД уменьшается с увеличением скольжения. В отличие от КПД коэффициент мощности такого привода зависит от передаваемого момента. Если приводным двигателем является асинхронный короткозамкнутый двигатель, то при номинальном моменте нагрузки  $\cos \phi$  будет наибольшим независимо от скольжения муфты. Это объясняется тем, что в данных условиях независимо от скольжения муфты двигатель потребляет из сети требуемую мощность. Мощность потерь на скольжение расходуется на нагрев якоря муфты. При передаче момента менее номинального значения,  $\cos \phi$  привода уменьшается так же, как у асинхронного двигателя.

Представляют интерес энергетические показатели привода с муфтой скольжения, работающей в режиме постоянного момента нагрузки, т. е.  $P_n = k n$  (рис. 53, а), в режиме вентиляторной нагрузки  $P_n = k n^3$  (рис. 53, б), в режиме постоянной мощности  $P = \text{const}$  (рис. 53, в). Кривые показывают, что абсолютные потери при вентиляторной нагрузке не превышают 17% от максимальной мощности, передаваемой муфтой, поэтому для данного случая целесообразны муфты

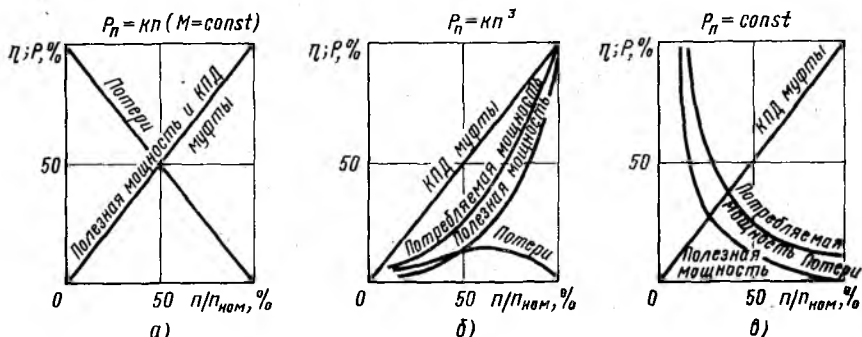


Рис. 53. Энергетические характеристики привода с муфтой скольжения



большой мощности (до 100 кВт) с применением интенсивного охлаждения якоря. Для работы в режиме постоянного момента из-за потерь на скольжение муфты больших мощностей нецелесообразны. Муфты для длительной работы в таком режиме ограничены мощностью 3—4 кВт. В повторно-кратковременном режиме или в режимах, когда работа происходит при малых скольжениях, мощность муфт, работающих при постоянном моменте, может быть повышена.

**Бесступенчатый электропривод серии ПМС** с асинхронным электродвигателем, электромагнитной муфтой скольжения и центробежным регулятором частоты вращения. Регулируемый электропривод серии ПМС предназначен для бесступенчатого регулирования частоты вращения рабочего механизма в диапазоне до 1:8. Привод серии ПМС применяется в металлорежущих и деревообрабатывающих станках, в узлах различных машин, где требуется регулирование частоты вращения при постоянном предельном значении момента. Приводы серии ПМС предназначены для работы в стационарных условиях на высоте не более 1000 м над уровнем моря, при температуре окружающего воздуха не выше 35 и не ниже 5°С. Для работы в химически агрессивной, взрывоопасной и токопроводящей среде приводы серии ПМС не рассчитаны.

Отклонение частоты вращения привода, вызванное изменением напряжения сети в пределах от +5 до —15% номинального значения при неизменной нагрузке, составляет 1% на каждый процент изменения напряжения сети. Отклонение частоты вращения от заданной, вызванное изменением нагрузки в пределах от 0,25  $M_{ном}$  до  $M_{ном}$ , не превышает 20%. Серия ПМС имеет шесть исполнений.

Так как естественные механические характеристики привода являются мягкими, в приводе серии ПМС применяется замкнутая

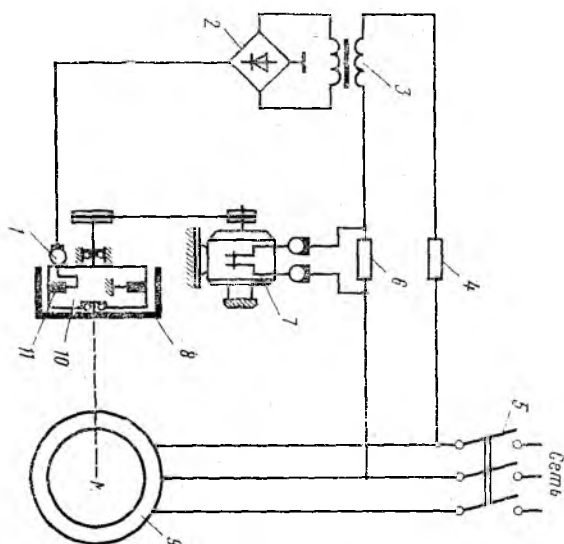


Рис. 54. Схема регулирования частоты вращения центробежным регулятором

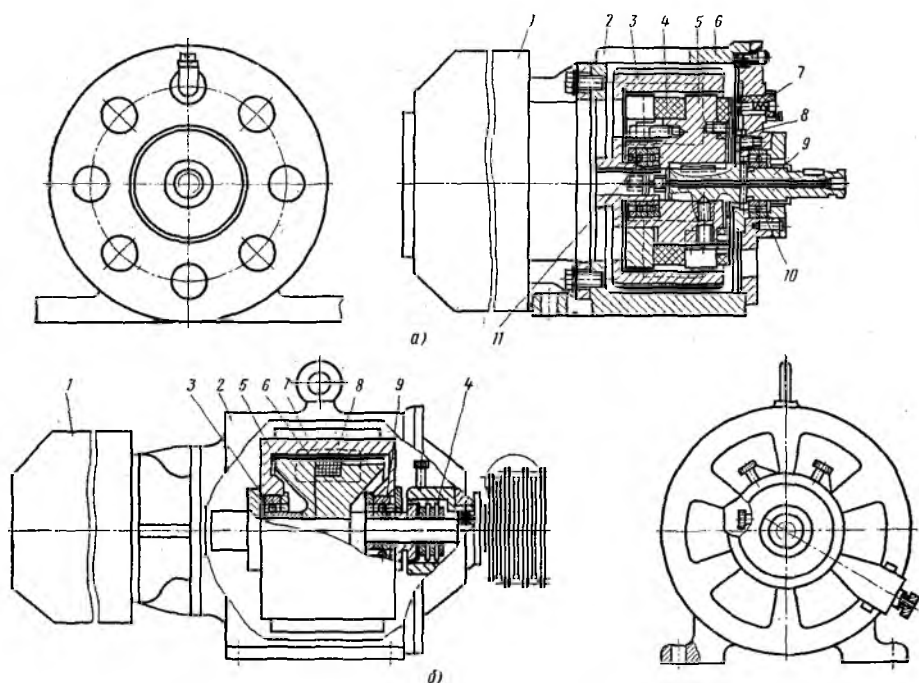


Рис. 55. Конструкция электроприводов серии ПМСМ

система автоматического регулирования частоты вращения с центробежным регулятором. Принцип работы привода поясняется электрической схемой (рис. 54). При включении выключателя 5 начинает вращаться асинхронный электродвигатель 9 вместе с якорем 8 муфты скольжения, жестко соединенным с валом электродвигателя. В начальный момент контакты центробежного регулятора частоты вращения 7 замкнуты и катушка возбуждения 11 питается максимальным постоянным током через щетку 1 от трансформатора 3 и выпрямителя 2, первичная обмотка которого подключена к сети через резистор 4.

Индуктор 10 муфты начинает вращаться. По мере нарастания частоты вращения магнитной системы увеличивается центробежная сила, действующая на якорь регулятора. Когда осевая составляющая центробежной силы станет больше силы пружин якоря, контакты регулятора размыкаются и вводят в первичную обмотку трансформатора резистор 6. Ток возбуждения муфты падает, скорость индуктора муфты уменьшается, что приводит к понижению центробежной силы и в связи с этим к повторному замыканию контактов регулятора. Частота вращения ведомой части муфты вновь начинает увеличиваться и т. д. Регулятор имеет частоту замыканий и размыканий контактов от 10 до 40 циклов в секунду.

**Комплектный регулируемый электропривод серии ПМСМ. Элек-**

троприводы серии ПМСМ отличаются от приводов серии ПМС наличием полупроводникового регулятора вместо центробежного. Они выпускались восьми типоразмеров с рядом крутящих моментов от 1,7 до 30 Н·м (в настоящее время от 6 до 30 Н·м). В комплект поставки входит агрегат электродвигатель — муфта, блок питания цепи возбуждения и регулирования ПМСУ, тахогенератор ТМГ-30П и задатчик скорости ПС.

Агрегат электродвигатель — муфта приводов (конструкция 1, 2 и 3-го видов) типов ПМСМ-1,7, ПМСМ-4 и ПМСМ-6 показан на рис. 55, а. Короткозамкнутый асинхронный электродвигатель 1 трехфазного тока соединяется с корпусом 2 электромагнитной муфты скольжения болтами. В корпусе располагаются ведущая часть муфты — якорь 3 и ведомая часть — магнитопровод 5. Последняя состоит из двух зубчатых половинок и катушки 4. Магнитопровод отделен от якоря воздушным зазором около 0,3 мм.

Якорь, изготовленный из стали марки Э12, представляет собой полый цилиндр с массивными стенками. Для соединения его с валом двигателя имеется ступица. Якорь крепится на валу двигателя шпонкой и винтом. На ступицу насажен шариковый подшипник 11, наружное кольцо которого служит опорой для магнитопровода муфты. Второй опорой является подшипник 10, закрепленный во фланце 6 корпуса муфты. Фланец соединяется с корпусом муфты винтами. Выходной вал 9 жестко закреплен в магнитопроводе шпонкой и стопорным винтом. Для смазки подшипников вал снабжен каналом и пресс-масленкой. Катушка питается через скользящий контакт, состоящий из токоведущего кольца 8, закрепленного на текстолитовом основании и меднографитовой щетки 7, расположенной в текстолитовом корпусе.

С целью увеличения теплоотдачи наружная поверхность якоря снабжена 24 поперечными ребрами охлаждения, в корпусе муфты имеются вентиляционные окна, закрытые решетчатым кожухом. Для крепления агрегата к основанию приводимого механизма служат шесть отверстий. Точная фиксация муфты производится двумя коническими шпильками. На выходном валу муфты имеются шпонка и гайка, навинчиваемая на конец вала 9, для крепления шкива. Шкив имеет две канавки, одна из которых служит для соединения через клиновый ремень с тахогенератором, а другая — с рабочим механизмом.

На рис. 55, б показана конструкция привода с электромагнитной муфтой скольжения 4, 5 и 6-го видов. Электродвигатель 1 присоединен к корпусу 2 муфты. Рабочие части муфты (индуктор 5 и якорь 8) выполнены из стали марки Э12 и заключены в корпус 2, имеющий лапы для крепления привода. Индуктор разъемный, состоит из двух половин, между которыми находится обмотка возбуждения 6. На цилиндрической поверхности обеих половин индуктора имеются по восемь зубцов, расположенных таким образом, чтобы зубцы одной половины индуктора находились против впадин другой. Индуктор закреплен на ведомом валу муфты, опирающемся на два шарикоподшипника 3 и 9. Для питания

катушки возбуждения предусмотрены два контактных кольца 4.

Для большей надежности работы при частых реверсах в приводе ПМСМ-10 применен асинхронный двигатель с отношением пускового момента к номинальному, равным 2,2. Электродвигатель фланцевого исполнения крепится к корпусу муфты болтами. Якорь 8 цельноточеный с охлаждающими ребрами, зафиксирован на валу двигателя. Выводные провода катушки проложены вдоль вала к контактным кольцам. Воздушный зазор между индуктором и якорем составляет 0,25—0,3 мм. Выходной конец вала привода имеет шкив 14 с тремя ручьями для клиновых ремней, два из которых предназначены для передачи момента ведущему валу, а третий, меньшего диаметра, — для вращения тахогенератора. Соотношение диаметров малого ручья шкива и шкива на тахогенераторе 1 : 0,9.

Тахогенератор типа ТМГ-30П представляет собой электрическую машину постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. На свободном конце вала тахогенератора насажен шкив для клиноременной передачи от шкива муфты. Блок регулятора ПМСУ состоит из панели питания и съемной панели усилителя, которые электрически соединяются между собой штепсельным разъемом, и смонтирован на основании. Задатчик скорости представляет собой ступенчатый потенциометр, собранный на основе ползункового переключателя ПП60-11, на внешней стороне которого припаяны 58 резисторов. Задатчик крепится на лицевую панель тремя винтами М4.

Принципиальная схема системы автоматического регулирования частоты вращения привода серии ПМСМ приведена на рис. 56. Схема представляет собой двухкаскадный усилитель постоянного тока с эмиттерной связью (триггер Шмидта), во втором каскаде которого использована схема составного транзистора на VT2 и VT3. Напряжение обратной связи с тахогенератора G по-

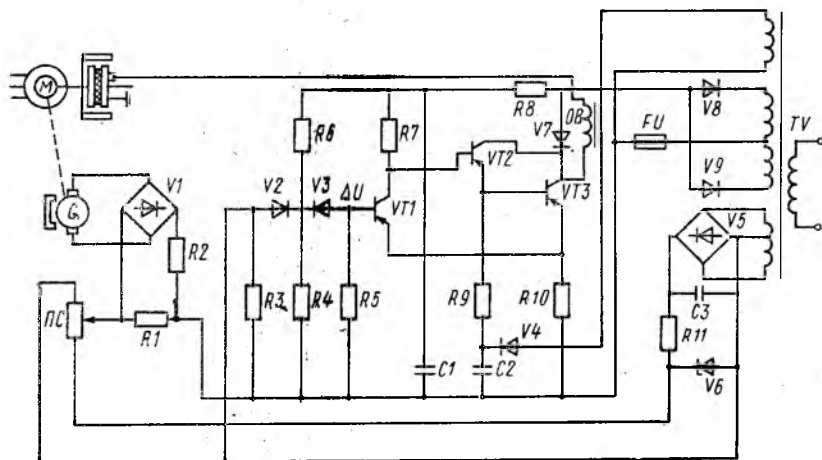


Рис. 56. Схема регулятора частоты вращения привода серии ПМСМ

ступает на резистор  $R1$ . Стабилизированное опорное напряжение с обмотки трансформатора  $TV$  подается на задатчик скорости  $ПС$ . В результате сравнения опорного напряжения и напряжения обратной связи на входе транзистора  $VT1$  появляется разностный сигнал  $\Delta U$ . Величина опорного напряжения, а следовательно, и частота вращения выходного вала электромагнитной муфты скольжения изменяются поворотом рукоятки переключателя задатчика скорости. При нулевом положении переключателя  $ПС$  релейный усилитель закрыт вследствие того, что на базу транзистора  $VT1$  подается лишь отрицательное напряжение смещения. Если входной сигнал  $\Delta U$  превысит порог срабатывания, транзистор  $VT1$  **закрывается**, а  $VT2$  и  $VT3$  открываются.

В цепь коллектора транзистора  $VT3$  включена обмотка возбуждения ( $ОВ$ ) электромагнитной муфты скольжения. Как только откроется транзистор  $VT3$ , по обмотке  $ОВ$  начнет протекать ток и частота вращения выходного вала муфты увеличивается до момента, когда сигнал  $\Delta U$  поменяет знак, транзистор  $VT1$  откроется, а  $VT2$  и  $VT3$  закроются и муфта начнет тормозиться под действием нагрузки. Далее все повторяется сначала. Обмотка возбуждения муфты питается от двухполупериодного выпрямителя, собранного на диодах  $V8$  и  $V9$  вторичной обмотки трансформатора  $TV$ . Напряжение смещения поступает с другой обмотки трансформатора  $TV$ . Выпрямленное напряжение смещения сглаживается емкостями  $C1$ ,  $C2$ . Для защиты транзистора  $VT3$  от недопустимых перенапряжений, возникающих в момент отключения тока через обмотку, последняя шунтируется диодом  $V7$ . Для защиты от коротких замыканий служит предохранитель  $FU$  на 4 А.

## **ТИРИСТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПУСКО-ТОРМОЗНЫМИ РЕЖИМАМИ И ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В данном разделе рассматриваются устройства, силовая схема которых состоит из встречно-параллельно соединенных тиристор-ров (или симисторов), установленных в цепи статора двигателя (рис. 57, б). Из рисунка видно, что при вращении в одну сторону работают пары тиристор-ов 1—3, в другую — 3—5. Встречно-параллельное включение тиристор-ов обусловлено включением их в цепь переменного тока: одну полу-волну сетевого напряжения пропускает один тиристор, другую — второй. Тиристорами управляет блок управления ( $БУ$ ). Такое устройство получило название тиристорного регулятора напряжения. Достоинством его является минимальное число силовых вентиля-ей. Посредством фазового управления тиристор-ами изменяется действующее напряжение ста-тора двигателя (рис. 57, а).

Простейшая схема устройства служит только для включения и отключения двигателя и называется бесконтактным пускателем, который обеспечивает замену контактных пускателей в режимах частых пусков и реверсов. Некоторые бесконтактные пускатели обеспечивают снижение пусковых токов и плавный разгон двига-

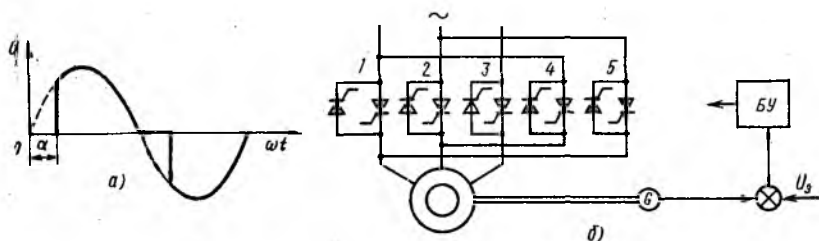


Рис. 57. Тиристорный регулятор напряжения серии ТСУ-Р:  
а — фазовое управление; б — силовая схема

теля. При плавном пуске темп возрастания момента двигателя замедлен, чтобы не допустить ударов в механических передачах станка. Кроме того, бесконтактные пускатели осуществляют динамическое торможение. Посредством открытия части тириستоров создается цепь подачи постоянного тока в обмотки двигателя.

Самым простым способом плавного регулирования частоты вращения служит изменение напряжения на обмотках статора двигателя. Диапазон регулирования частоты вращения при постоянном моменте не более 1 : (1,2—1,5). Несмотря на малый диапазон регулирования, этот способ невыгоден из-за больших потерь в двигателе, т. е. КПД привода мал. Увеличение диапазона регулирования с малым отклонением частоты вращения может быть получено применением обратной связи по частоте вращения, что требует пристройки к двигателю тахогенератора (Г).

Рассмотрим работу регулируемого электропривода с тиристорным регулятором напряжения. Задающий сигнал требуемой частоты вращения сравнивается с сигналом обратной связи. Сигнал обратной связи, снимаемый с тахогенератора, пропорционален истинной частоте вращения. Разность данных сигналов является управляющим сигналом. Если этот сигнал положительный, то частота вращения меньше заданной, например из-за увеличения момента сопротивления. Управляющий сигнал приводит к увеличению угла проводимости тиристоров  $\alpha$ , повышается напряжение на статоре и, соответственно, значение критического момента двигателя. В результате увеличивается частота вращения, приближаясь к заданной.

Для управления пуско-тормозными режимами, реверсом и регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей предназначены тиристорные системы управления серии ТСУ-Р. Система управления снабжена защитами от короткого замыкания, перегрузки, обрыва фаз, коммутационного перенапряжения и нулевой защитой. ТСУ-Р работает по принципам, описанным выше. При наличии тахогенератора обеспечивается диапазон регулирования частоты вращения 1 : 10. ТСУ-Р выпускается на номинальные токи 4—100 А (мощность двигателей до 40 кВт). В некоторых модификациях имеется динамическое торможение. Время пуска, реверса или динамического торможения может ре-

гулироваться от 0,01 до 0,25 с. Величина токовой отсечки задается в пределах 1—4  $I_{\text{ном}}$ . Подробные данные и описание приводятся в каталоге ЛК 08.06.20—77. Тиристорные системы управления ТСУ-МУЗ, ТСУ-РИУЗ.

В ряде станков при обработке заготовки с неравномерным припуском или использовании тонкого инструмента (например, при глубоком сверлении) необходимо ограничение нагрузки приводов. Нагрузка главного привода ограничивается посредством влияния на привод подачи, например, при росте припуска снижается подача.

Команда о превышении нагрузки может сниматься с трансформатора тока. Следует учитывать, что момент и мощность асинхронного двигателя не являются прямо пропорциональными току статора из-за изменения коэффициента мощности. Более точное измерение момента или мощности выполняется, если кроме трансформатора тока используется трансформатор напряжения. В результате геометрического сложения их сигналов, взятых с определенными коэффициентами, вычисляется сигнал на выходе, пропорциональный моменту.

Отключение электропривода при превышении определенной величины момента нагрузки имеет место в зажимных механизмах. Известны конструкции зажимных устройств, в которых при достижении необходимого усилия срабатывает конечный выключатель. После этого отключается двигатель. Более точно работает зажимной механизм, если двигатель отключается по команде реле максимального тока, катушка которого установлена в цепи статора двигателя. Реле срабатывает при токе, превышающем двойную номинальную величину.

В ряде станков предусматривается точный останов некоторых механизмов. Кроме других факторов, влияние на точность останова оказывает частота вращения, с которой начинается торможение. Поэтому перед точным остановом производят понижение частоты вращения.

Здесь рассмотрены электроприводы, не требующие плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне, но на которые возложена задача точного останова. Режим пониженной («ползучей») частоты вращения получается, если на обмотки двигателя одновременно подается переменный и постоянный ток. Асинхронная машина работает в совмещенных режимах: двигательном и динамического торможения. Результирующая механическая характеристика имеет участок с двигательным моментом и низкой ( $0 \div 0,15$ )  $n_{\text{ном}}$  частотой вращения. Этот режим по условиям нагрева двигателя должен быть кратковременным.

## ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Системы управления преобразователями и регулирования электроприводов состоят из элементов различных типов. В электроприводах с полупроводниковыми преобразователями, выпущен-

ных ранее, использовались обычные компоненты (транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и т. д.), а также логические бесконтактные элементы. В последние годы широко применяют интегральные микросхемы — цифровые и аналоговые.

Выходные сигналы цифровых микросхем могут принимать только одно из двух значений; одно значение соответствует состоянию «Включено», другое — «Выключено». Наиболее широко используют элементы потенциального типа. Их сигналы, как правило, могут иметь высокий или низкий уровни потенциала напряжения. Высокий уровень обычно обозначается 1 («Включено»), а низкий — 0 («Выключено»). Потенциалы выходного напряжения элементов потенциального типа изменяются только в моменты переключения состояния схемы управления. Известны, кроме того, импульсные схемы, которые переключаются при поступлении на их вход импульса.

Цифровые элементы делят на комбинационные, последовательные, элементы задержки и релейные выходные усилители. Выходные сигналы (функции) комбинационных (логических) элементов определяются только комбинацией входных сигналов (переменных) в данный момент времени. Последовательные устройства содержат элементы памяти. Их выходные сигналы определяются не только комбинацией входных сигналов, но и их состоянием в предшествующие моменты времени. Аналоговые элементы характеризуются тем, что входные и выходные сигналы могут принимать любые непрерывные значения в заданных пределах.

Рассмотрим типовые схемы систем управления и регулирования. Логические элементы соответствуют простым схемам на электромагнитных реле, каждый логический элемент эквивалентен какой-либо цепи, составленной из контактов реле. В последнее время реле заменяются бесконтактными логическими элементами. Они имеют один или несколько входов и, как правило, один выход (иногда кроме прямого выхода имеется инверсный выход, сигнал которого противоположен сигналу прямого). Если в цепи катушки реле включен замыкающий (нормально открытый) контакт другого реле, то первое реле и его замыкающий контакт выполняют функцию повторения; логический элемент, реализующий эту функцию, называется повторителем. Если в цепи катушки реле имеются несколько параллельно соединенных замыкающих контактов, то реле включится, если будет замкнут или первый, или второй, или третий и т. п., соответственно выходной сигнал элемента примет значение 1, а реле и элемент реализуют функцию ИЛИ (логическое сложение).

Логический элемент, заменяющий реле с несколькими последовательно включенными в его цепи замыкающими контактами, осуществляет функцию И. Реле включается только тогда, когда замкнуты первый, второй и третий контакты и т. п., т. е. все контакты в цепи реле. Соответственно, если есть сигналы на первом, втором и третьем входах и т. п. (т. е. на всех входах), только тогда на выходе элемента будет сигнал. Эту функцию называют



также логическим умножением или схемой совпадения. Если в цепи катушки первого реле включен размыкающий (нормально закрытый) контакт другого реле, то эта цепь выполняет функцию НЕ (инверсии, отрицания). На выходе элемента НЕ нет сигнала, когда есть сигнал на его входе и наоборот.

Кроме указанных выше элементарных функций, часто используются следующие функции. Размыкающий контакт реле, цепи включения катушки которого собрана по схеме И либо ИЛИ, выполняет функцию И—НЕ либо ИЛИ—НЕ. Известны элементы с более сложными логическими функциями. Обычно серии логических элементов включают несколько типовых элементов (микросхем), из которых можно построить более сложные схемы.

Серийные бесконтактные элементы имеют основные (базовые) универсальные элементы ИЛИ—НЕ (транзисторная серия Логика-Т) или И—НЕ (интегральные микросхемы К155, К511).

В серии логических элементов входят, как правило, и триггеры. Триггеры соответствуют релейно-контактным схемам памяти, имеющим входы включения и выключения. Соответствующие входы триггеров называют запускающими (устанавливающими и сбрасывающими. Триггеры имеют прямые и инверсные выходы.

В серийных электроприводах ранее применяли транзисторные логические элементы Логика-Т (например, ПТЧКШ). В этой системе сигналы имеют отрицательный потенциал. На элементы подается напряжение питания —12 или 24 В и напряжение смещения +6 В. Логическая единица — отрицательное напряжение не менее 4 В, напряжение логического нуля не более —1 В. В серию Логика-Т входят следующие группы элементов: логические, например Т101 (ИЛИ—НЕ), Т107 (И); триггеры Т102 и Т103 функциональные (Т202 и др.); элементы задержки и выдержки времени (Т303); усилители (Т402 и Т403). Имеются специальные блоки питания элементов серии Логика-Т. Элементы серии Логика-Т конструктивно представляют собой схемы из отдельных компонентов, помещенных в отдельные корпуса и залитые специальным составом.

Широко используют интегральные микросхемы, которые выполняют по разным технологическим принципам. По одной из технологий предусматривается изготовление определенной функциональной схемы: компонентов и соединений между ними на одном кристалле полупроводника. При этом обеспечиваются малые массы и размеры, высокая надежность. В одном корпусе может быть несколько микросхем (элементарных ячеек). В электроприводах станков получили применение в основном две серии цифровых (дискретных) микросхем: К155 и К511.

Напряжение питания микросхем К155 равно +5 В. Логическая единица — положительное напряжение не менее 2,4 В, а напряжение логического нуля не более 0,4 В. Серия К155 включает логические элементы И—НЕ на два входа (К155ЛА3—4 элемента в корпусе), три (К155ЛА4—3 элемента), четыре (К155ЛА1—2 элемента) и восемь входов (К155ЛА2). Кроме то-

го, имеются двухвыходовые (K155ЛА8 — четыре элемента) и четырехвыходовые (K155ЛА7 — два элемента) элементы с открытым коллектором (выходом). Элементы с открытым коллектором имеют большую выходную мощность, они обычно применяются в качестве выходных каскадов и могут питать соответствующую нагрузку. Между коллекторным выходом и питанием подсоединяется нагрузка или резистор. В серию входят триггеры K155ТВ и K155ТМ. Кроме того, серия содержит более сложные микросхемы: счетчики, дешифраторы и т. д.

Серия K511 отличается высокой помехоустойчивостью. Напряжение питания составляет +15 В. Напряжение логической единицы не менее 12 В, а логического нуля — не более 1,5 В. В серии имеются двух- (K511ЛА1 — четыре элемента), трех- (K511ЛА2 — три элемента) и четырехвыходовые схемы И—НЕ (K511ЛА3 — два элемента). Серия также содержит элементы И с открытым коллектором (K511ЛИ1). Для согласования с микросхемами серий, имеющих напряжение питания 5 В, служат преобразователи уровня K511ПУ1 (из высокого в низкий) и K511ПУ2 (из низкого в высокий). Кроме того, в эту серию входят триггер K511ТВ1, двоично-десятичный счетчик K511ИЕ1 и дешифратор K511ИД1.

В отличие от информации цифровых микросхем аналоговые микросхемы выдают информацию в виде непрерывных во времени (аналоговых) напряжений и токов как на входе, так и на выходе. Наиболее распространенными являются операционные усилители (ОУ) и компараторы. Применение этих элементов позволяет улучшить точностные, эксплуатационные и другие показатели систем управления электроприводами.

Основными показателями ОУ являются коэффициент усиления по напряжению (от 1000 до 100000), температурный дрейф напряжения смещения нуля (5—50) мкВ·С°, напряжение питания, максимальная амплитуда выходного напряжения. ОУ имеют два входа: прямой А и инверсный В. При подаче напряжения на прямой вход полярность выходного напряжения соответствует полярности входного, при подаче напряжения на инверсный вход полярность напряжения на выходе противоположна полярности входного напряжения.

В связи с большим коэффициентом усиления на выходе ОУ может возникнуть генерация. Для предотвращения этого усилитель охватывают цепями коррекции, состоящими из RC-элементов. Если дрейф нуля превышает норму, ОУ необходимо балансировать. С этой целью на его вход подается напряжение смещения, обеспечивающее нуль на выходе при нуле на входе. На рис. 58, а показана схема включения ОУ, где R2, C1 — цепь коррекции, R6 — балансирующий потенциометр с резистором R5, R1 — резистор обратной связи, R3, R4 — входные резисторы. Питание ( $\pm U_n$ ) подается на ОУ от отдельного источника питания.

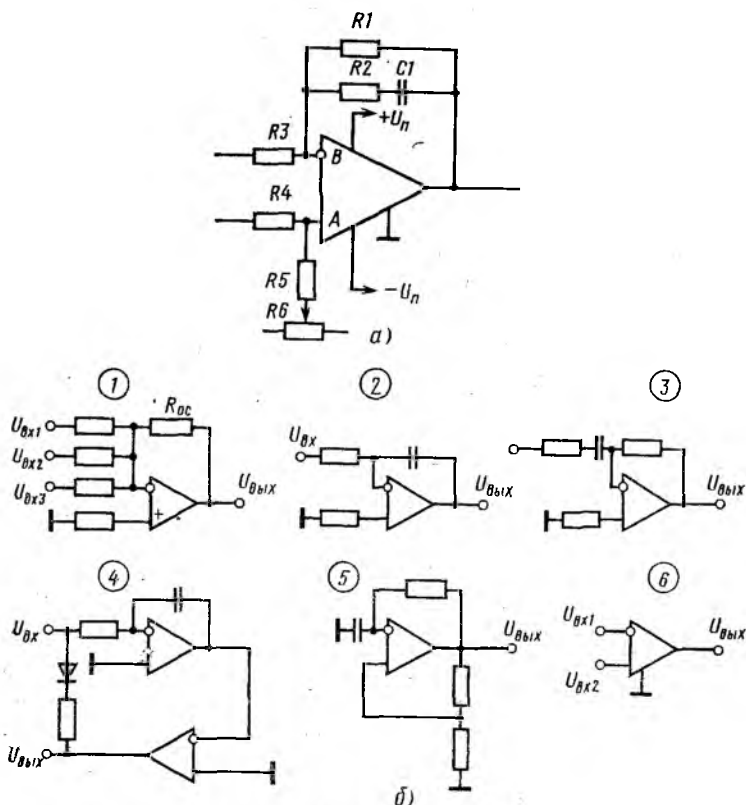


Рис. 58. Операционный усилитель:  
а — схема; б — базовые схемы включения

В системах управления электроприводов постоянного тока, а также в приводах переменного тока и вентильных электроприводах ОУ широко применяют в качестве устройств, обеспечивающих функции усилителей, узлов, выполняющих математические операции, преобразователей напряжение — импульс, импульс —

### 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СЕРИЙНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

ОУ	Коэффициент усиления $k \cdot 10^{-3}$	Дрейф нуля, $\text{мкВ} \cdot ^\circ\text{C}$	Напряжение питания, В
К140УД1	10—25	35	$\pm 12$
К553УД1	50	30	$\pm 15$
К551УД1	100	5—10	$\pm 15$
К140УД7	$> 5$	5	$\pm 15$
К140УД8	25	5—10	$\pm 15$
К140УД13	$< 0,1$	0	$\pm 15$

напряжение и др., генераторов сигналов различной формы, стабилизаторов напряжений, схем сравнения и т. д. На рис. 58, б приведены базовые схемы включения ОУ для выполнения операций суммирования (1), интегрирования (2), дифференцирования (3), преобразования напряжения в импульсы (4), генератора прямоугольных импульсов (5) и сравнения (6). Технические данные серийных ОУ приведены в табл. 5.

## РАБОТА СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

В схемах электроприводов малой мощности с преобразователями частоты или с широтно-импульсными преобразователями постоянного тока (прерывателями) применяют силовые транзисторы. При этом не требуются используемые в тиристорных схемах громоздкие цепи для запираания (выключения) тиристоров. В данном разделе объясняется работа транзисторных ключей, включающих в себя также обратные вентили и защитные цепи. Обратные вентили служат для создания цепи реактивного тока обмоток двигателя от ЭДС самоиндукции. Под термином ключ понимают силовой управляемый прибор вместе со вспомогательными цепями. Это устройство является самостоятельным и основным элементом силовой схемы преобразователя. Ключ может находиться в одном из двух состояний: включено — он замыкает силовую цепь, выключено — он размыкает силовую цепь.

Транзисторы в преобразователях работают в режиме переключения и, как правило, по схеме с общим эмиттером (рис. 59, а). Для повышения коэффициента усиления в ряде преобразователей применяется схема составного транзистора (схема Дарлингтона). При этом объединяются коллекторы обоих транзисторов, а эмиттер входного транзистора соединен с базой выходного (рис. 59, в). На рис. 59, б приведены зависимости тока коллектора ( $I_K$ ) транзистора от напряжения эмиттер-коллектора ( $U_{ЭК}$ ) для различных значений тока базы. Режимы работы транзистора (отсечка и на-

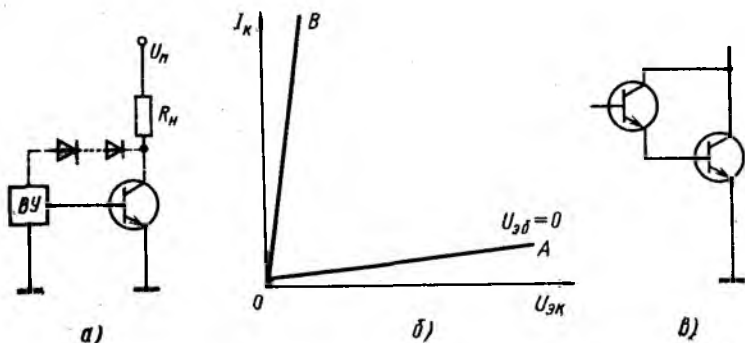


Рис. 59. Схема соединения транзисторов с общим эмиттером (а), характеристики (б) и составной транзистор (в)

сыщение) обусловлены токами базы и коллектора. В силовой преобразовательной технике используются, главным образом, транзисторы проводимости типа  $n-p-n$ , применительно к которым мы будем дальше указывать полярность напряжения питания и управления. Если к базе приложено отрицательное напряжение относительно эмиттера ( $U_{эб}$ ), то транзистор закрыт и почти все напряжение питания ( $U_n$ ) прикладывается к электродам эмиттера и коллектора. Ток нагрузки пренебрежимо мал, мощность, рассеиваемая на транзисторе, минимальна. Граничной кривой области отсечки соответствует значение  $U_{эб}=0$ . Режим отсечки транзистора соответствует разомкнутому состоянию управляемого силового ключа преобразователя.

При подаче на базу транзистора положительного напряжения относительно эмиттера достаточной величины транзистор переключается в режим насыщения. Область насыщения ограничена линией  $ОВ$ . Падение напряжения на транзисторе (напряжение эмиттер — коллектор) составляет 1—3 В. Режимы насыщения и отсечки удачно сочетаются с ключевым характером работы силовых управляемых приборов в инверторах и прерывателях. Когда ключ преобразователя замкнут, падение напряжения на транзисторе пренебрежимо мало по сравнению с напряжением питания преобразователя, достигающим сотни вольт, т. е. практически всё напряжение прикладывается к нагрузке. При этом ток нагрузки  $I_k = U_n / R_n$ . Благодаря малому падению напряжения мощность, рассеиваемая на транзисторе, не является чрезмерной. Для того чтобы ввести транзистор в состояние насыщения, требуется обеспечить определенную величину тока базы. Эта величина обуславливается заданным значением тока коллектора (нагрузки) и коэффициентом усиления конкретного транзистора. При дальнейшем значительном увеличении тока базы усиливается глубина насыщения, а падение напряжения транзистора уменьшается в малой степени.

В обоих режимах отсечки и насыщения, называемых статическими, проще обеспечить «безопасную» работу транзисторов. В этих режимах при большом значении одного из параметров (ток или напряжение) другой имеет малое значение, т. е. мощность рассеивания на транзисторе, равная произведению тока падения напряжения на переходе эмиттер — коллектор, не превышает допустимой величины. Переключение транзистора из режима отсечки в режим насыщения и наоборот проходит через активную область. В отличие от первых двух режимов активный характеризуется большими потерями мощности, так как одновременно могут иметь место значительные величины тока коллектора и напряжения эмиттер — коллектор. Поэтому в преобразователях приняты меры по снижению времени переключения и созданию такого режима переключения, чтобы не было одновременного образования больших коллекторных токов и напряжений. Во время выключения сначала режим транзистора смещается к границе области насыщения (интервал задержки), а затем ток кол-

лктора спадает до очень малой величины (интервал запираания).

Так как во многих случаях серийно выпускаемые транзисторы не могут обеспечить требуемый ток нагрузки, то в преобразователях применяется параллельное соединение транзисторов. Для более равномерного распределения тока между отдельными транзисторами в цепи их эмиттеров устанавливаются уравнивающие резисторы небольшой величины, которые в некоторых преобразователях используются как датчики тока для токовой защиты.

Если силовой транзистор работает на границе режимов (активного и насыщения), то уменьшается время выключения транзистора и снижается ток базы, последнее способствует разгрузке блока питания предварительных усилителей в цепи базы. Кроме того, выравниваются характеристики транзисторов и облегчается их параллельная работа. Наиболее близкая к активному режиму точка работы транзистора с наибольшим падением напряжения выбирается для режимов перегрузки. Однако, если выбрать режим работы транзистора по каким-то определенным значениям токов коллектора и базы, то при увеличении тока нагрузки транзистор перейдет в активный режим, что нежелательно. Для обеспечения стабильной величины напряжения эмиттер — коллектор служит отрицательная обратная связь с коллекторов транзисторов на выходные усилители ( $BV$ ), регулирующие ток базы (рис. 59, а). В цепи обратной связи устанавливают маломощные диоды. При этом сравниваются: суммарное падение напряжения на указанных диодах и падение напряжения эмиттер — коллектор. Если увеличится ток нагрузки и соответственно падение напряжения эмиттер — коллектор, то обратная связь воздействует на выходной усилитель таким образом, что повышается ток базы. В результате транзистор приоткрывается и падение напряжения эмиттер — коллектор возвращается к заданному уровню.

Работу силовых транзисторов необходимо рассматривать совместно с обратным (шунтирующим) вентилем, через который протекает реактивный ток двигателя. Для исключения отрицательного тока через транзистор необходимо подавать на базу отрицательное напряжение на время, когда транзистор не должен проводить. Рассмотрим работу транзисторного ключа инвертора, частота которого равна выходной частоте инвертора. Транзисторный ключ включает в себя обратный вентиль ( $V3$  или  $V4$ ) и защитную цепочку от перенапряжений ( $R1 - V5 - C1$  или  $R2 - V6 - C2$  рис. 60, а). Цепь  $R - V - C$  уменьшает скорость нарастания напряжения эмиттер — коллектор транзистора при его отключении. Благодаря этому снижается мощность рассеяния транзистора. Кроме того, эта цепь облегчает параллельную работу транзисторов по следующей причине. Как известно, серийные транзисторы имеют разные времена выключения. При отсутствии указанной цепочки суммарный ток отключения ключа протекал бы через один наиболее медленно выключающийся транзистор, который мог бы выйти из строя. Благодаря защитной цепи ток протекает через ее конденсатор.

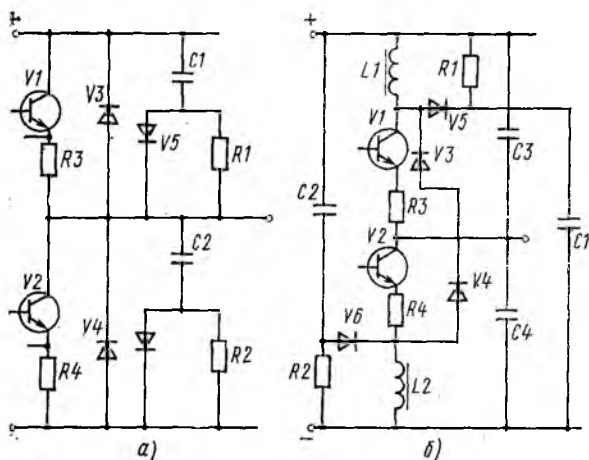


Рис. 60. Схемы транзисторных ключей:

а — ключ, работающий на выходной частоте инвертора; б — ключ, работающий на несущей частоте

После заряда конденсатора цепи выключаемого транзистора ток нагрузки замыкается через обратный клапан второго ключа этой же фазы, но подключенного к другой шине источника постоянного тока. После коммутационной паузы, которая больше времени заряда конденсатора защитной цепи первого ключа, подается открывающий сигнал на второй ключ. Благоприятным является то, что силовые транзисторы открываются при малом напряжении эмиттер — коллектор, а ток нагрузки плавно нарастает после спада реактивного тока до нуля. При следующем включении транзистора первого ключа конденсатор разряжается через резистор и упомянутый транзистор.

В инверторах, работающих на несущей частоте, переключение ключей одной фазы производится при постоянном направлении тока нагрузки. Поэтому в случае двигательной нагрузки при очередном включении транзистора одного ключа начинает протекать сквозной ток через этот транзистор и обратный клапан второго ключа до восстановления запирающих свойств вентиля. Дело в том, что после того, как клапан перестал проводить в прямом направлении, требуется некоторое время, чтобы клапан восстановил свои запирающие свойства.

Ограничение указанного тока осуществляется дросселями  $L1$  и  $L2$  (рис. 60, б). После выключения транзисторов  $V1$  или  $V2$  ток дросселей падает и проходит через клапан  $V5$  или  $V6$  на конденсатор  $C1$  или  $C2$ , которые разряжаются на резисторы  $R1$  или  $R2$ . Конденсаторы  $C3$  и  $C4$ , так же как конденсатор  $C1$  или  $C2$  (рис. 60, а), ограничивают скорость нарастания напряжения на запираемых транзисторах. После очередного открытия транзисторов ток разряда конденсатора  $C3$  или  $C4$  через транзисторы ограничивается дросселем  $L1$  или  $L2$ .

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Для бесступенчатого изменения частоты вращения преобразователей в широком диапазоне применяется способ частотного управления, т. е. регулирования частоты и величины напряжения статора двигателя переменного тока. Преобразователи частоты имеют на входе напряжение фиксированной частоты сети 50 Гц, а на выходе — напряжение, плавно изменяемое в требуемых пределах. Существует большое разнообразие преобразователей частоты, большинство из которых группируется по трем основным признакам: преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, которые содержат выпрямитель и инвертор (инвертор преобразует постоянный ток в переменный с плавно регулируемой частотой); преобразователи частоты с непосредственной связью, каждый полупериод выходного напряжения которых формируется из нескольких положительных и отрицательных полупериодов напряжения сети; преобразователи частоты с промежуточным звеном переменного тока повышенной частоты, состоящие из двух преобразователей: первый преобразует сетевую частоту в повышенную и имеет однофазный или трехфазный выход, второй — полученную повышенную частоту в выходную пониженную регулируемой величины.

Преобразователи с непосредственной связью, выполненные на тиристорах без дополнительных устройств искусственной коммутации, имеют ограничение максимальной выходной частоты величиной около 20—25 Гц, что не позволяет применять их для станочных электроприводов. Преобразователи с непосредственной связью, выполненные на транзисторах, свободны от ограничения максимальной выходной частоты, но применимы только для электроприводов малой мощности и содержат большое число транзисторов. Преобразователи с промежуточным звеном переменного тока являются сложными и по этой причине не нашли применения в станочных электроприводах.

В станочных электроприводах применяют, как правило, преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока (рис. 61). Термин промежуточное звено обозначает наличие цепи постоянного тока между выпрямителем и инвертором. Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_d$  на выходе неуправляемого выпрямителя  $V$  неизменно по величине, а в случае управляемого выпрямителя среднее значение напряжения может регулироваться в соответствии с условиями работы привода. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения применяют фильтр, состоящий из конденсатора  $C_f$  и дросселя  $L$ .

Трехфазный мостовой инвертор (рис. 61) содержит шесть полностью управляемых ключей  $V1 \dots V6$ , к которым подключены три обмотки статора двигателя. Известны инверторы с интервалом проводимости ключей 120 или 180 эл. градусов. Период выходного напряжения составляет 360 эл. градусов. Рассмотрим работу инвертора для интервала 120 эл. градусов. От импульсов системы



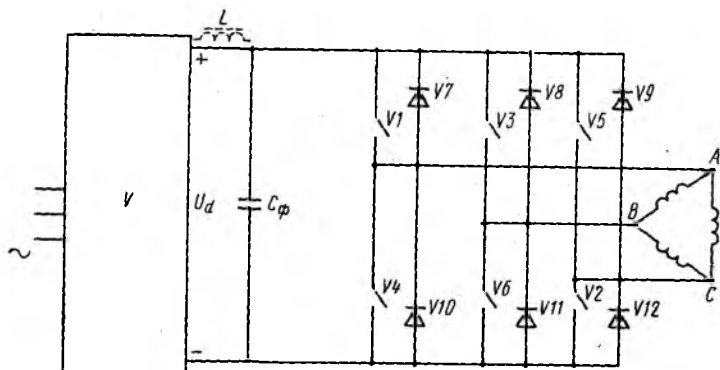
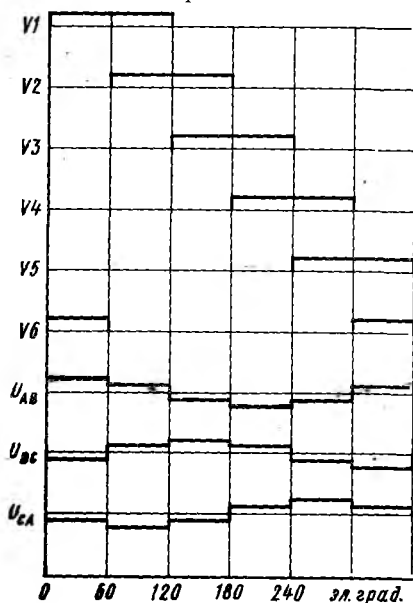


Рис. 61. Схема преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока

управления ключи  $V1 \dots V6$  поочередно открываются через 60 эл. градусов в указанной согласно их номерам последовательности (рис. 62).

Прямоугольники напряжения соответствуют проводящему состоянию ключей.

Рассмотрим формирование напряжения на нагрузке. В интервале времени, когда проводят ключи  $V1$  и  $V6$  (см. рис. 61), создается цепь: «+» источника —  $V1-A-B-V6$  — «-» источника постоянного тока. Таким образом, к фазе  $AB$  нагрузки прикладывается напряжение звена постоянного тока  $U_d$  в положительном направлении. Положительным направлением принято



считать протекание тока по фазам нагрузки от  $A$  к  $B$ , от  $B$  к  $C$ , от  $C$  к  $A$ . Параллельно фазе  $AB$  подключены соединенные между собой последовательно фазы нагрузки  $BC$  и  $CA$ , к которым в это же время прикладывается напряжение по  $0,5 U_d$  в отрицательном направлении.

В следующем интервале 60 эл. градусов возникает цепь «+» источника —  $V1-A-C-V2$  — «-» источника. В это время полное отрицательное напряжение  $U_d$  прикладывается к фазе  $CA$ , а к остальным двум — по  $0,5 U_d$  в положительном направлении. Если дальше проследить работу инвертора, то можно убедиться

Рис. 62. Диаграмма напряжений инвертора

что к нагрузке, соединенной в «треугольник», прикладывается трехфазная симметричная система напряжений. Прямоугольно-ступенчатая форма выходного напряжения близка к синусоидальной. Величина этого напряжения прямо пропорциональна значению  $U_d$ , а частота определяется частотой переключения управляемых ключей инвертора. Если нагрузкой является двигатель, то при отключении фазы двигателя очередным управляемым ключом в обмотке возникает ЭДС самоиндукции. Для создания замкнутой цепи (в прежнем направлении) реактивного тока двигателя, вызванного ЭДС самоиндукции, служит обратный мост вентилей  $V7 \dots V12$ . Предположим, что проводит  $V5$ ; выключается ключ  $V4$  и включается  $V6$ . Ток, протекающий через  $V4$  и фазу двигателя  $AB$ , замыкается через вентили  $V7, V11$  и конденсатор фильтра  $C_\Phi$ . Благодаря этому происходит затухание реактивного тока, а реактивная энергия воспринимается конденсатором фильтра  $C_\Phi$ .

Описанный выше инвертор называется инвертором напряжения. В данном случае индуктивность дросселя фильтра намного меньше индуктивности нагрузки или дроссель совсем отсутствует. Форма выходного напряжения прямоугольно-ступенчатая, а форма выходного тока определяется формой напряжения и коэффициентом мощности нагрузки. Это объясняется тем, что на входе инвертора имеется конденсатор фильтра большой емкости, который стремится поддерживать величину напряжения постоянной. Инвертор по диаграмме работы через свои ключи выдает в обмотки двигателя импульсы постоянного напряжения, из которых образуется кривая выходного напряжения инвертора; для тока двигателя есть пути замыкания через обратные вентили. Существуют инверторы тока, в которых обязательно имеется дроссель фильтра, причем его индуктивность больше индуктивности нагрузки. Кроме того, отсутствуют конденсатор фильтра и обратные вентили. Инвертор тока задает на выходе прямоугольно-ступенчатую форму тока. Дроссель фильтра стремится поддерживать постоянную величину тока. Инвертор через свои ключи питает обмотки двигателя импульсами тока.

В станочных приводах нашли применение, главным образом, инверторы напряжения. Они не имеют ограничения по максимальной выходной частоте напряжения, имеют меньшие емкости коммутирующих конденсаторов, позволяют регулировать и формировать благоприятную кривую выходного напряжения. Для электроприводов средней и большой мощности вместо транзисторов используются обычные тиристоры, которые не могут запираются импульсом по управляющему электроду. Так как в инверторах тиристоры подключены к источнику постоянного напряжения, то для их запираания требуются дополнительные цепи, обеспечивающие снижение тока тиристора до нуля в требуемый момент времени. Такие цепи получили название коммутирующих, а процессы — коммутационных. Чаще применяются цепи, при которых ток тиристора снижается до нуля за счет протекания встречного

тока разряда конденсатора, предварительно заряженного напряжением обратной полярности.

Различаются инверторы с одно- и двухступенчатой коммутацией. В инверторах первого типа (рис. 63) запираание выходящего из работы тиристора начинается в момент включения очередного (входящего в работу) тиристора; частота коммутаций данного тиристора равна выходной частоте инвертора. Данный тип инверторов называют также инвертором с пофазной или поочередной или однократной коммутацией. Инвертор с одноступенчатой коммутацией по наиболее простой схеме имеет недостаток: коммутирующий конденсатор часть периода подключен к нагрузке и разряжается на нее. В результате требуется большая величина емкости конденсатора для обеспечения необходимой энергии за-

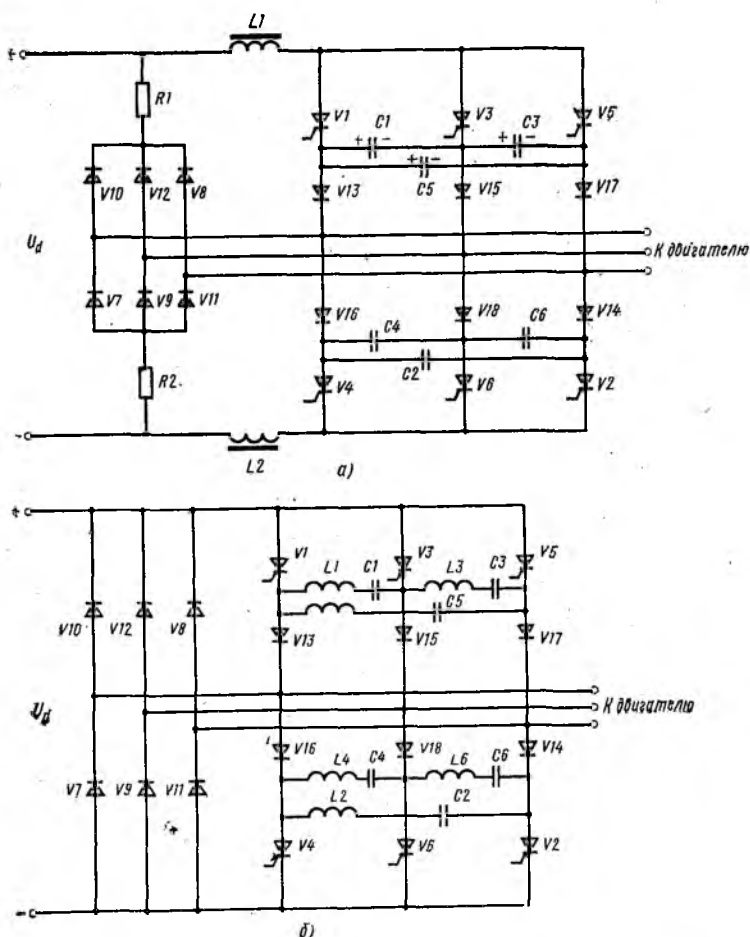


Рис. 63. Схемы инверторов с одноступенчатой коммутацией:

*а* — коммутирующие дроссели расположены в шинах постоянного тока; *б* — последовательное соединение коммутирующих дросселей и конденсаторов

пирания тиристоров. Для исключения указанного недостатка в схему инвертора вводятся отсекающие вентили  $V13 \dots V18$  (рис. 63, а), которые отключают конденсаторы от нагрузки после окончания их перезаряда (в интервалах между коммутационными процессами). Кроме того, отсекающие вентили предотвращают или уменьшают вибрации двигателя. Как будет показано ниже, такие вибрации могут возникнуть при работе двигателя от преобразователя частоты. Следует отметить, что при работе инвертора на частотах выше 400 Гц действие отсекающих вентилях ослабляется, так как время перезаряда становится соизмеримым с периодом выходной частоты.

Рассмотрим работу трехфазного инвертора, содержащего коммутирующие дроссели  $L1$  и  $L2$ , расположенные в шинах постоянного тока между тиристорами  $V1 \dots V6$  инвертора и обратным мостом вентилях  $V7 \dots V12$ ; коммутирующие конденсаторы  $C1 \dots C6$ ; отсекающие вентили  $V13 \dots V18$ . Эта схема нашла применение для питания двигателей с номинальной частотой 50 Гц. Начнем рассмотрение работы схемы, когда проводят тиристоры  $V1$  и  $V2$ , полярность заряда коммутирующих конденсаторов  $C1$ ,  $C3$ ,  $C5$  показана на рис. 63, а. Как только включается очередной тиристор  $V3$ , сразу создается контур разряда конденсатора  $C1$  через  $V3$  и  $V1$ . Ток разряда направлен навстречу току нагрузки тиристора  $V1$ . Когда ток разряда возрастет до величины тока нагрузки, тиристор  $V1$  закроется. Напряжение на конденсаторе  $C1$  стремится к нулю, при этом к тиристорам прикладывается отрицательное напряжение. В указанном интервале схемой предоставляется время для восстановления запирающих свойств тиристора. Затем создается контур перезаряда конденсатора  $C1$ : «+» источника —  $L1-V3-C1-C5-V17-V14-V2-L2$  — «-» источника; т. е. левая обкладка  $C1$ , предварительно заряженная до положительной полярности, теперь подключена к отрицательному полюсу источника. Так как в эту цепочку входят конденсаторы и дроссели, то перезаряд происходит колебательно.

В процессе перезаряда ток конденсатора  $C1$  увеличивается до наибольшего значения, а напряжение на конденсаторе изменяет полярность на противоположную. Перезаряд оканчивается, через дроссели  $L1$  и  $L2$  протекают свободно циркулирующие токи между инвертором и обратным мостом, так как ток дросселя не может мгновенно упасть до нуля. Эти токи паразитные, они дополнительно нагружают тиристоры и вентили. Для более быстрого затухания токов дросселей служат резисторы  $R1$  и  $R2$ , установленные последовательно с обратным мостом вентилях. Через каждые 60 эл. градусов характер коммутационных процессов повторяется. Коммутирующие дроссели  $L1$  и  $L2$  необходимы, чтобы получить требуемые значения: наибольшую величину тока, время разряда и перезаряда конденсатора.

Чтобы запереть рабочие тиристоры с определенным током нагрузки, коммутирующие конденсаторы должны иметь достаточную энергию во всем диапазоне регулирования частоты. Так как со

снижением частоты двигателя необходимо понижать напряжение на входе инвертора, то соответственно уменьшается энергия коммутирующего конденсатора  $W_c = CU^2/2$ . Чтобы не завышать чрезмерно величину конденсатора, во многих схемах инверторов применяют подзаряд коммутирующих конденсаторов от дополнительных источников постоянного тока. Мощность дополнительных источников мала по сравнению с мощностью преобразователя. При малых диапазонах регулирования напряжения устройство подзаряда не применяется.

В станочных приводах применяется также схема инвертора (рис. 63, б), в которой отсутствуют свободно циркулирующие токи. Назначение  $V1 \dots V18$ ,  $C1 \dots C6$  то же, что и в схеме рис. 63, а. Коммутирующие дроссели  $L1 \dots L6$  установлены последовательно с коммутирующими конденсаторами. Перед очередной коммутацией ток коммутирующей цепочки равен нулю. Разберем работу схемы при запираии тиристора  $V1$ . Конденсатор  $C1$  заряжен до максимального значения с полярностью, показанной на рис. 63, а. При включении тиристора  $V3$  образуется контур разряда конденсатора  $C1$  через тиристоры  $V3$  и  $V1$ . Ток разряда  $C1$  растет и при достижении им величины тока нагрузки тиристора  $V1$  последний запирается. В этот момент времени начинается проводить ток вентиль  $V7$  и образуется новый контур  $V7 - V13 - V3$ . Ток разряда конденсатора переходит через наибольшую величину, а напряжение конденсатора меняет знак. В момент времени, когда ток конденсатора снизится до величины тока нагрузки тиристора, выключится вентиль  $V7$  и включится вентиль  $V10$ . Начинается подзаряд коммутирующего конденсатора, после которого завершаются коммутационные процессы на данном такте работы инвертора.

Инверторы с двухступенчатой коммутацией кроме основных (главных или рабочих) содержат вспомогательные (гасящие или коммутирующие) тиристоры. В инверторах с двухступенчатой коммутацией происходит независимое включение и отключение рабочих тиристоров разных фаз, запираение рабочего тиристора начинается в момент включения гасящего. Частота коммутации рабочих тиристоров не зависит от выходной частоты и может быть равна ей или значительно превышать последнюю.

Рассмотрим одну из использующихся схем инвертора (рис. 64) с гасящими тиристорами ( $V15 \dots V20$ ). Инвертор содержит рабочие тиристоры ( $V1 \dots V6$ ), мост обратных вентилях ( $V7 \dots V12$ ) с резисторами  $R1$  и  $R2$ , коммутирующие конденсаторы ( $C2 \dots C4$ ) и дроссели  $L1$ ,  $L2$ , тиристоры подзаряда  $V13$ ,  $V14$ , вентили  $V21$ ,  $V22$ , которые разделяют источник подзаряда от звена постоянного тока преобразователя частоты. Источник подзаряда  $U_n$  имеет нерегулируемое напряжение. Пусть в данный момент времени проводят  $V1$ ,  $V3$  и  $V2$ , через которые течет ток к двигателю. При открывании гасящего тиристора  $V15$  начинает разряжаться конденсатор  $C3$  через тиристор  $V1$ . После запираии  $V1$  происходит перезаряд конденсатора  $C3$  через обратный вентиль  $V9$ , резистор

Рис. 64. Схема инвертора с гасящими тиристорами

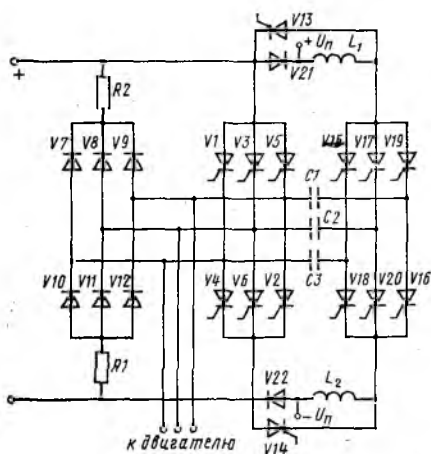
$R2$ , разделительный вентиль  $V21$ , коммутирующий дроссель  $L1$ , тиристор  $V15$ . По завершении перезаряда  $C1$  начинает проводить  $V4$ . Одновременно включаются тиристоры подзаряда  $V14$  и повторно  $V15$ . От дополнительного источника происходит подзаряд конденсатора  $C3$ . В следующие такты работы инвертора коммутационные процессы аналогичны.

Кроме регулирования частоты, преобразователи должны также изменять выходное напряжение. Существует несколько основных способов регулирования напряжения в преобразователях частоты: напряжение регулируется в управляемом выпрямителе; между неуправляемым (нерегулируемым) выпрямителем и инвертором устанавливается прерыватель, благодаря которому регулируется напряжение; напряжение регулируется в инверторе. Во втором и третьем случаях могут применяться тиристорные выпрямители, которые служат только для бесконтактного включения и отключения силовой схемы преобразователя.

Работа управляемого выпрямителя в преобразователе частоты и в приводе постоянного тока в основном аналогична. Преобразователь частоты с управляемым выпрямителем имеет низкий коэффициент мощности на входе. Для сглаживания напряжения на выходе выпрямителя устанавливается фильтр со значительными величинами индуктивности и емкости. Последнее, кроме ухудшения массогабаритных показателей, приводит к ухудшению динамических свойств электропривода.

Второй способ регулирования напряжения свободен от указанных выше недостатков. Прерыватель (шиотно-импульсный преобразователь) работает на частоте 1—2 кГц. Однако в данном случае преобразователь осуществляет тройное преобразование энергии, что также приводит к ухудшению массогабаритных и энергетических показателей.

Третий способ регулирования напряжения реализуется в инверторах, работающих на несущей частоте. Коммутация силовых управляемых ключей инвертора происходит многократно на более высокой (несущей) частоте, а кривая средних значений напряжения изменяется с более низкой частотой, являющейся выходной для инвертора. Осуществляется широтно-импульсное регулирование (ШИР), заключающееся в том, что с изменением ширины импульса на каждом периоде несущей частоты регулируются



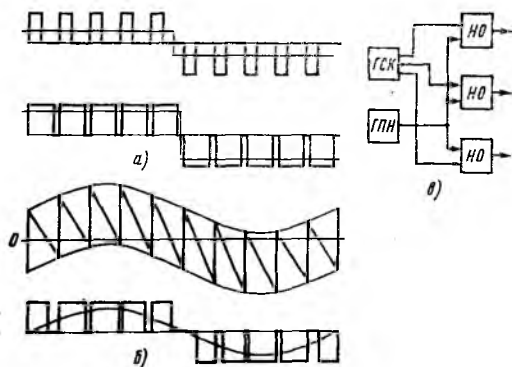


Рис. 65. Формирование выходного напряжения в системах с ШИР и ШИМ:

а — диаграмма напряжений в системе с ШИР; б — диаграмма напряжений в системе с ШИМ; в — система управления инвертором с ШИМ

средние величины напряжения и соответственно действующая величина выходного напряжения инвертора (рис. 65,а).

Кроме достоинств, присущих второму способу, преимущество данного способа состоит в том, что и регулирование частоты и регулирование напряжения осуществляется в одном блоке преобразователя частоты — в инверторе.

Недостатком данного способа является необходимость работы инвертора на высокой частоте, что предъявляет более жесткие требования к элементам преобразователя и приводит к значительным потерям в нем, особенно в случае тиристорного инвертора. При применении тиристорных инверторов необходимо использование инверторов с двухступенчатой коммутацией, содержащих вспомогательные тиристоры. В транзисторных инверторах отсутствуют дополнительные силовые элементы. Для транзисторных инверторов работа на несущей частоте в режиме ШИР предъявляет высокие требования к защитным цепочкам, в том числе к защите транзисторов от сквозных токов.

Для качественной работы электроприводов с широким диапазоном регулирования применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) или другой способ управления, обеспечивающие близкую к синусоидальной форму тока двигателя. В указанных случаях переключение силовых управляемых ключей также производится многократно за период выходной частоты и одновременно, как правило, регулируется напряжение в инверторе. Способ синусоидальной ШИМ (рис. 65,б) заключается в том, что ширина импульсов от периода к периоду несущей частоты изменяется по синусоидальному закону. Так, на периодах несущей частоты, соответствующих 90 и 270 эл. градусов выходной частоты, ширина импульсов максимальная, а на периодах — 0 и 180 эл. градусов ширина минимальна. Кривая средних величин напряжения периодов несущей частоты за период выходной частоты формируется по синусоиде.

Для регулирования напряжения на входе инвертора или для питания двигателя постоянного тока служат прерыватели (рис. 66). Прерыватели соединяются последовательно между нерегулируемым выпрямителем и указанной выше нагрузкой. Прерыватели работают на частоте в несколько кГц. Если силовой управляемый ключ  $V1$  (на основе тиристора или транзистора)

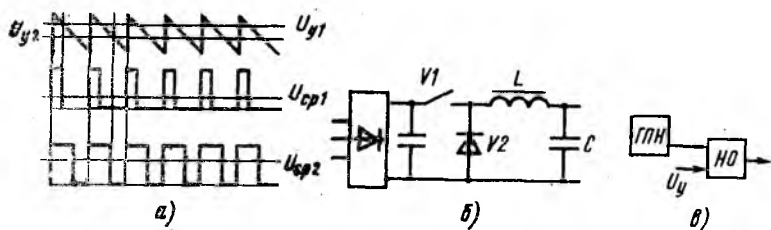


Рис. 66. Прерыватель:

*а* — диаграмма напряжений; *б* — силовая схема; *в* — схема системы управления

закрывает, то выходное напряжение равно нулю. Если время открытого состояния ключа приближается к периоду несущей частоты (за вычетом времени на коммутационные процессы), то выходное напряжение максимально и оно практически равно напряжению на его входе. При изменении ширины импульса (времени включения ключа) регулируется среднее значение напряжения за период (рис. 66, *а*). Для получения сглаженного напряжения на выходе прерывателя служит  $LC$ -фильтр (рис. 66, *б*). Шунтирующий вентиль  $V2$  обеспечивает непрерывный ток, замыкая цепь нагрузки при размыкании ключа  $V1$ . Коммутирующие цепи тиристорного ключа такие же, как в инверторах. Чаще применяется двухступенчатая коммутация со вспомогательным тиристором.

Системы управления выпрямителями, входящие в состав преобразователей частоты, аналогичны по принципу работы с системами, используемыми в приводах постоянного тока, и здесь не рассматриваются.

Системы управления инверторами (СУИ) служат для формирования заданной последовательности импульсов включения силовых ключей инвертора, гасящих тириستоров и тиристоров подзаряда. В общем случае СУИ обеспечивает регулирование частоты, а в ряде преобразователей и регулирование напряжения, образование формы кривой напряжения и реверс выходных фаз. Системы управления инвертором выдают шестифазную последовательность импульсов со сдвигом 60 эл. градусов (см. рис. 62), где диаграмме проводимости силовых ключей соответствуют выходные импульсы СУИ. Типовая схема СУИ состоит из соединенных последовательно: задающего генератора (ЗГ), распределителя импульсов (РИ), формирователя длительности импульсов (ФИ) и выходных усилителей (ВУ) (рис. 67, *а*).

Типовая СУИ работает следующим образом. Импульсы ЗГ распределяются в шестифазную систему РИ (по числу ключей инвертора), затем формируются в ФИ по длительности (в долях от периода) в соответствии с требуемой диаграммой работы ключей инвертора и, наконец, усиливаются в ВУ по мощности, необходимой для управления ключами. В некоторых системах ФИ объединены с РИ, а в ряде других — с ВУ. Задающие генераторы определяют плавное регулирование выходной частоты



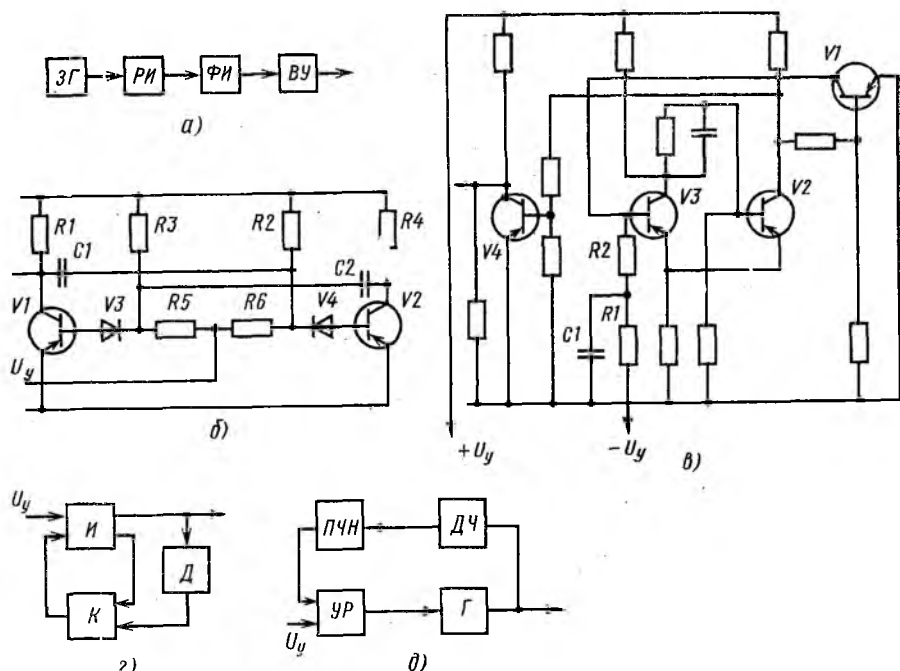


Рис. 67. Схемы управления инвертором (а) и задающих генераторов на мультивибраторе (б), триггере (в), интеграторе (г), с коррекцией частоты (д)

инвертора пропорционально входному сигналу от системы автоматического управления. В инверторах с однократной коммутацией, частота работы которых равна выходной частоте, имеется один ЗГ, вырабатывающий прямоугольные импульсы. Применяются генераторы прямоугольных импульсов, построенные на мультивибраторах, с использованием генератора пилообразных напряжений или построенные на других принципах.

Рассмотрим одну из схем ЗГ, представляющую собой управляемый мультивибратор на транзисторах (рис. 67, б). Для ступенчатого изменения частоты (при смене двигателя, имеющего другую номинальную частоту) производится ступенчатое переключение конденсаторов. Плавное изменение частоты обеспечивается сигналом управления ( $U_y$ ). Другая схема ЗГ (рис. 67, в) содержит триггер на транзисторах  $V_2, V_3$  [15]. Предположим в данный момент времени  $V_2$  открыт,  $V_3$  закрыт; когда напряжение конденсатора  $C_1$  достигает величины напряжения включения транзистора  $V_3$ , начинается процесс перехода триггера в другое устойчивое состояние, т. е. открывается  $V_3$  и закрывается  $V_2$ . Это приводит к включению  $V_1$  и разряду  $C_1$  через указанный транзистор и резистор  $R_2$ . Схема приходит в первоначальное положение. Регулирование частоты обеспечивается изменением управляющего

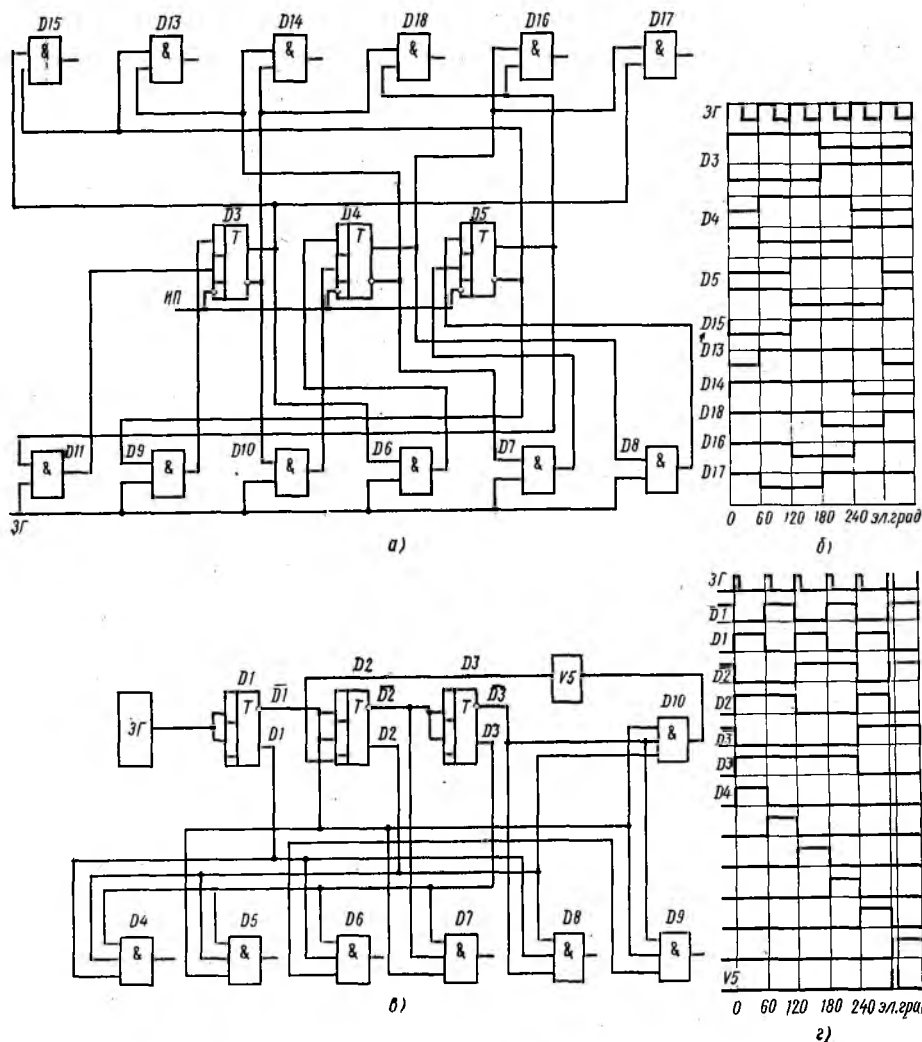


Рис. 68. Схемы счета импульсов и формирователи импульсов:  
а, б — ПТЧКШ; в, г — ТПЧ-40

напряжения, определяющего время заряда  $C1$ . Пределы регулирования зависят от параметров  $C1$  и  $R1$ .

В некоторых преобразователях задающий генератор построен на интегральных микросхемах. Задающий генератор (преобразователь ПЧ-4-200) содержит интегратор ( $I$ ) на ОУ (рис. 67, г). В момент равенства напряжения интегратора, взятого с делителя ( $D$ ), и напряжения на конденсаторе в цепи обратной связи интегратора компаратор ( $K$ ) сработает и его выходное напряжение станет отрицательным. С этого момента указанный конденсатор

разряжается до нуля. Когда напряжение на конденсаторе уменьшится до нуля, компаратор снова переключится, конденсатор начнет заряжаться до нового момента равенства напряжений. Выходное напряжение компаратора имеет прямоугольную форму.

ЗГ (преобразователь ПЧ-3,5-3200 [14]) содержит генератор (Г), делитель частоты (ДЧ), преобразователь частоты в напряжение (ПЧН) (рис. 67, д). На вход усилителя рассогласования (УР) поступает управляющее напряжение и сигнал обратной связи с преобразователя частота — напряжение. Напряжение рассогласования прямо пропорционально разности выходной частоты и частоты, заданной управляющим напряжением. Это напряжение корректирует выходную частоту ЗГ, что обеспечивает линейность и стабильность характеристики генератора.

Следующий узел системы управления инвертором — распределитель импульсов, который получает импульсы от ЗГ, преобразует их в шестифазную систему. РИ выполняется по пересчетной схеме или на базе счетчика. Схема счета импульсов (кольцевой коммутатор) показана на рис. 68, а. В первоначальном состоянии на инверсных выходах триггеров  $D3 \dots D5$  (элементы T102) имеются сигналы 1. Эти сигналы поступают на входы элементов  $D9, D10, D7$  (элементы T107). При поступлении импульса от ЗГ указанные выше элементы выдают сигналы 1, которые поступают на входы триггеров. Однако переключается только триггер  $D3$ ; переключение триггера зависит от его состояния и от входа, на который приходит импульс. С приходом следующего импульса ЗГ сработает от  $D6$  триггер  $D4$ , затем переключится триггер  $D5$ . При появлении четвертого по счету импульса ЗГ триггер  $D3$  вернется в исходное положение. Потом соответственно придут в первоначальное положение  $D4$  и  $D5$ . Таким образом пересчетная схема завершит период своей работы. Из диаграммы (рис. 68, б) видно, что на выходе схемы образуется система импульсов, каждый из которых имеет длительность 180 эл. градусов. При этом частота импульсов уменьшилась в 6 раз по сравнению с частотой ЗГ.

Схемы, показанные на рис. 68, в, г, выполнены по другому принципу [15]. Начнем рассматривать работу схемы с исходного положения, когда на прямых выходах триггеров  $D1, D2$  и  $D3$  имеются сигналы 0 (потенциал близок к нулю), а на инверсных выходах — сигналы 1. В это время имеется импульс на выходе элемента  $D4$  диодной матрицы. После прихода импульса от ЗГ переключается триггер  $D1$  (состояние других триггеров остается неизменным) и появляется импульс на выходе  $D5$ . При поступлении второго импульса ЗГ переключение  $D1$  приводит к переключению триггера  $D2$  и к появлению импульса на выходе  $D6$ . Третий импульс ЗГ вызывает переключение  $D1$  и появление импульса на выходе  $D7$ . В результате появления четвертого импульса возникает импульс на выходе  $D8$ . При поступлении пятого импульса ЗГ срабатывают  $D1$  и  $D10$ , импульсы которого через транзистор обратной связи  $V5$  перебрасывают триггер  $D2$ ; на выходе последнего элемента  $D9$  формирователя появляется шестой выходной

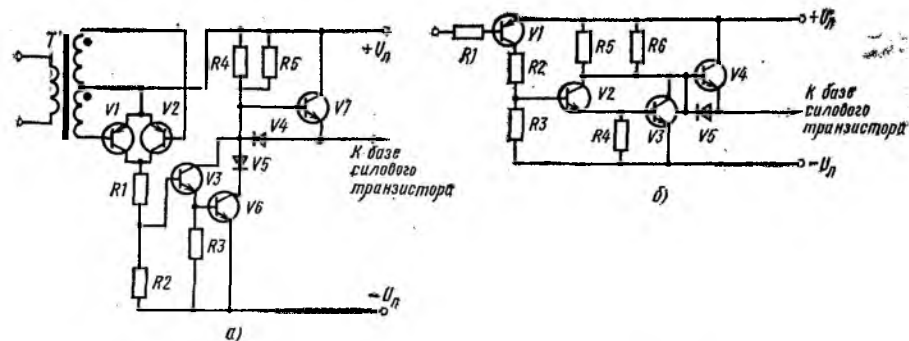


Рис. 69. Выходные усилители системы управления с гальваническим изолированием (а) и без гальванического изолирования (б)

импульс. Затем работа пересчетной схемы повторяется. Таким образом, на выходах элементов  $D4 \dots D9$  образуются импульсы длительностью по 60 эл. градусов.

ФИ получает от пересчетного кольца импульсы длительностью, как правило, 180 эл. градусов. Формирователь (рис. 68,а) построен на элементах  $D13 \dots D18$  (Т107 серии Логика-Т), на выходе которых образуются импульсы шириной 120 эл. градусов, составляющие шестифазную систему.

ФИ, объединенный с выходным усилителем, построен по принципу ждущего блокинг-генератора [15]. Блокинг-генератор запускается от входного импульса и выдает мощный узкий импульс. Шесть блокинг-генераторов образуют шестифазную систему импульсов. Далее на тиристоры поступает по паре узких импульсов, полученных со смежных блокинг-генераторов.

Выходные усилители системы управления транзисторным инвертором (преобразователи ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200) выполняют по двум схемам. Выходные усилители транзисторными ключами, подключенными к положительной шине звена постоянного тока, обеспечивают гальваническое изолирование СУИ от силовой схемы (рис. 69,а). На первичные обмотки трансформаторов ВУ подаются импульсы управления, заполненные высокочастотными импульсами. Высокочастотные импульсы вырабатываются дополнительным генератором заполнения (см. рис. 74). Заполнение основного широкого импульса высокочастотными сделано для уменьшения подмагничивания трансформатора и соответственно снижения его размеров. Импульсы со вторичных обмоток трансформаторов преобразуются вновь для получения широких импульсов без заполнения. Каждый выходной усилитель питается от своего изолированного двухполярного источника питания. Так как эмиттеры силовых транзисторов, подключенных к отрицательной шине звена постоянного тока, объединены между собой, то выходные усилители, управляющие ими, питаются от общего источника (рис. 69,б). В этом случае выходной усилитель выполнен без трансформатора и гальванического изолирования, а средний

(нулевой) вывод источника питания образуется делителем из конденсаторов. При отсутствии сигнала управления выходное напряжение усилителя отрицательно и силовой ключ заперт. Для обоих типов выходных усилителей средние (нулевые) выводы источников питания соединяются с эмиттерными резисторами силовых транзисторных ключей.

Рассмотрим системы управления инверторами с ШИР и широтно-импульсными преобразователями постоянного тока (прерывателями). Многие системы управления построены (см. рис. 66, в) по вертикальному принципу. При этом управляющее напряжение  $U_y$  совместно с пилообразным (или треугольным) сигналом подаются на нуль-орган (НО) или компаратор напряжения. Частота генератора пилообразного напряжения (ГПН) задает частоту работы инвертора или прерывателя, которая называется несущей. При увеличении управляющего сигнала изменяется момент срабатывания НО и тем самым возрастает относительное время (ширина) импульса на периоде несущей частоты. Система управления прерывателем выдает одну последовательность регулируемых по ширине импульсов (см. рис. 66, а); управляющее напряжение является напряжением постоянного тока заданной величины.

СУИ инвертора с ШИР может быть построена по следующему принципу. Аналогично, как в прерывателе, на выходе НО (рис. 66) образуется последовательность высокочастотных импульсов шириной, задающей выходное напряжение инвертора. Указанные импульсы суммируются в ФИ с шестифазной системой импульсов, полученных в РИ из импульсов ЗГ. Система управления инвертором с ШИМ по синусоидальному закону (см. рис. 65, в) содержит трехфазный генератор синусоидальных колебаний (ГСК). Частота и амплитуда синусоидального напряжения задают соответственно частоту и величину выходного напряжения инвертора (см. рис. 65, б). В этих системах также применяются генераторы пилообразного (или треугольного) напряжения.

## АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Серийные станочные регулируемые асинхронные электроприводы являются преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Указанные электроприводы содержат на входе понижающий сетевой трансформатор и автоматический выключатель, обычно устанавливаемый на первичной стороне трансформатора. Автоматический выключатель служит для защиты от коротких замыканий и подключения электропривода к сети. Функцию защиты от коротких замыканий в некоторых электроприводах выполняют быстродействующие плавкие предохранители, а функцию нулевой защиты электропривода — контактор на входе преобразователя.

Частота вращения вспомогательного (холостого хода) асинхронного двигателя прямо пропорциональна частоте его питания.

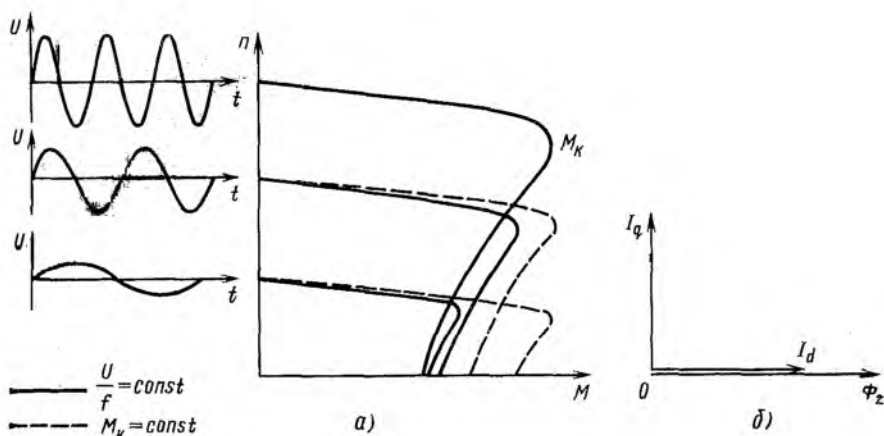


Рис. 70. Характеристики двигателя:

*а* — при изменении частоты и напряжения; *б* — векторная диаграмма токов

Частота может регулироваться вверх или вниз от номинального значения, например 50 Гц. При подаче на нагруженный двигатель номинальных частоты  $f_{\text{ном}}$  и напряжения  $U_{\text{ном}}$  в его обмотках статора протекает номинальный ток. Этому соответствует номинальная величина индуктивного сопротивления обмоток  $x_{L_{\text{ном}}} = 2\pi f_{\text{ном}} L$ . По мере снижения частоты одновременно уменьшается  $x_L$ . Если оставить напряжение на номинальном значении, например 220 В, то по закону Ома начнет расти ток через обмотку статора, что может привести к ее перегоранию. Поэтому с уменьшением  $f_1$  надо уменьшать напряжение на статоре  $U$  (рис. 70, *а*). Уменьшение напряжения  $U = U_{\text{ном}} f_1 / f_{\text{ном}}$ .

Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении статора, то напряжение питания двигателя  $U$  можно считать равным ЭДС намагничивания двигателя  $E$ , которая пропорциональна потоку  $\Phi$  двигателя, числу витков обмотки и частоте напряжения на статоре. Так, при снижении напряжения пропорционально частоте величина потока остается близкой к номинальной. Момент двигателя пропорционален произведению тока на поток. Как известно, регулирование частоты вращения электрических двигателей вниз от номинального значения может осуществляться с постоянным (номинальным) моментом. Это обычно подразумевает работу с номинальным потоком и с постоянным (номинальным) током, т. е. при поддержании неизменным отношения  $U/f_1$  регулирование производится с постоянными моментом и перегрузочной способностью. Требуемые зависимости напряжения от частоты при регулировании частоты вращения называют законами регулирования. С увеличением диапазона регулирования частоты вращения вниз от номинальной пренебрежение падением напряжения на сопротивлении статора приводит к все большему снижению критического момента по сравнению с номи-

нальным. Существенная разница появляется уже при диапазоне регулирования около 1:3. Существуют различные способы компенсации падения напряжения на сопротивлении статора.

При компенсации падения напряжения в разомкнутой системе регулирования имеется следующее ограничение. При возрастании нагрузки от нагрузки холостого хода до номинальной увеличивается падение напряжения на сопротивлении статора, пропорциональное току. Поэтому при постоянном напряжении питания ЭДС намагничивания и соответственно поток на холостом ходу становится больше. При существенной компенсации падения напряжения на низких частотах происходит повышение потока холостого хода и увеличение тока намагничивания. Последнее приводит к значительным потерям и перегреву двигателя.

Избежать указанного недостатка удастся в замкнутых системах регулирования с обратными связями по параметрам, реагирующим на изменение нагрузки. Электроприводы с небольшим диапазоном регулирования частоты вращения содержат положительную обратную связь по току двигателя, воздействующую на канал регулирования напряжения. При увеличении нагрузки возрастает ток двигателя, в результате становятся больше сигнал управления ( $U_y = U_z + U_{oc}$ , где  $U_{oc} = K_{oc}I$ ) и напряжение питания двигателя. Указанное увеличение напряжения питания двигателя компенсирует падение напряжения на сопротивлении статора. Данная система регулирования обеспечивает сохранение критического момента двигателя на уровне номинального критического. Одновременно привод обычно содержит отрицательную обратную связь по напряжению выпрямителя, которая стабилизирует напряжение на входе инвертора при колебании напряжения сети и компенсирует падение напряжения во внутреннем сопротивлении преобразователя частоты.

Развитием описанной выше системы регулирования является САР с так называемой обратной связью по ЭДС. В данном случае из сигнала, пропорционального напряжению двигателя, вычитается сигнал, пропорциональный произведению тока на активное сопротивление статора, т. е. вычитаемое представляет собой падение напряжения на указанном сопротивлении. Результирующий сигнал отрицательной обратной связи пропорционален внутренней ЭДС двигателя, он сравнивается с задающим сигналом, пропорциональным частоте. САР поддерживает постоянство отношения упомянутой ЭДС к частоте.

В технических требованиях к электроприводам оговаривается допустимое относительное отклонение частоты вращения (отношение абсолютного падения  $\Delta n$  к частоте вращения холостого хода  $n_c$ ). В описанной выше системе регулирования поддерживается постоянным абсолютное отклонение (падение) частоты вращения, а относительное падение частоты вращения увеличивается по мере снижения заданной частоты вращения и может превысить допустимую величину. Дальнейшее уменьшение относительного отклонения частоты вращения достигается в САР с воздействием

на канал регулирования — частоту питания. Так, в системе с обратной связью по току при увеличении нагрузки возрастает управляющий сигнал по каналу частоты, повышается частота питания двигателя (двигатель переходит на более «высокую» механическую характеристику). Поэтому при том же моменте нагрузки повышается частота вращения и снижается ее отклонение относительно точки холостого хода.

В асинхронных электроприводах с более широким диапазоном регулирования применяется обратная связь по частоте вращения. Указанная обратная связь требует установки на двигателе тахогенератора или какого-либо другого типа датчика. Отрицательная обратная связь по частоте вращения может воздействовать на канал частоты и напряжения. При увеличении нагрузки первоначально падает частота вращения, увеличивается напряжение управления. Воздействие на канал напряжения преобразователя обеспечивает поддержание постоянной перегрузочной способности (и косвенно величины потока). Воздействие на канал частоты инвертора обеспечивает уменьшение неустойчивости (отклонения) частоты вращения благодаря повышению частоты питания двигателя.

Качественную работу электроприводов с более широким диапазоном регулирования обеспечивают системы частотно-токового управления. В этих системах за счет обратной связи по току управляемый выпрямитель (или инвертор с ШИР или ШИМ) становится регулятором тока, двигателю задается не напряжение, а ток. Преимущество систем частотно-токового управления состоит в том, что выходной параметр регулятора (ток статора) не зависит от частоты питания двигателя, системе легче реагировать на изменение нагрузки, так как момент пропорционален абсолютному скольжению  $\beta = (n_c - n) / n_{\text{ном}}$ , которое измерить проще. Такая система работает следующим образом.

В результате вычитания сигнала обратной связи по частоте вращения из задающего сигнала определяется напряжение, пропорциональное абсолютному скольжению. Сигнал абсолютного скольжения поступает на функциональный преобразователь, который задает величину тока по одному из законов, обеспечивающих или минимальный ток, или минимальные потери двигателя. Выходной сигнал функционального преобразователя после сравнения с сигналом обратной связи по току управляет выпрямителем. Частота питания двигателя задается в виде алгебраической суммы частоты тока ротора и частоты вращения. Далее частоту тока ротора будем называть частотой ротора. САР по частотно-токовому принципу применяется, как правило, в тиристорных электроприводах с инвертором тока.

В приводах подачи некоторых станков с ЧПУ используют высокودинамичные асинхронные электроприводы с векторным управлением. Их появление связано с тем, что традиционные системы частотного регулирования перестали удовлетворять повышенным требованиям к качеству работы электроприводов и расширенному диапазону регулирования частоты вращения.



Необходимо остановиться на новом методе построения САР частотных электроприводов, получившем название **векторного**. Сущность метода заключается в том, чтобы систему регулирования двигателя переменного тока сделать похожей на систему регулирования двигателя постоянного тока, у которого определяющими величинами являются ток в цепи якоря  $I_a$  и ток в цепи обмотки возбуждения  $I_b$ . В системе регулирования привода формируются сигналы:  $I_q$ , пропорциональный моменту двигателя (а это аналог  $I_a$ ), и  $I_d$ , задающий величину магнитного потока двигателя (который является аналогом  $I_b$ ).

Почему появилась необходимость в разработке векторной САР? Дело в том, что в отличие от двигателей постоянного тока напряжение и ток двигателей переменного тока изменяются по синусоидальной кривой. Поэтому даже при постоянной действующей величине напряжения или тока их мгновенные значения меняются. При построении САР иметь дело с синусоидально изменяющимися переменными очень трудно. Поэтому в обычных частотных системах регулировались только действующие величины переменных и это не позволяло создавать быстродействующие асинхронные электроприводы.

Зависимости, характеризующие реальный трехфазный двигатель, преобразуются к условному двухфазному двигателю. Фазы этого двигателя расположены под углом  $90^\circ$  друг относительно друга. Токи и напряжения этих двух фаз принимаются за проекции обобщенных параметров статора или ротора двигателя. Эти обобщенные напряжения и токи, построенные в прямоугольной системе координат, оси которой расположены (ориентированы) вдоль двух фаз статора двигателя, называются векторами. Теперь после преобразования к двухфазному двигателю токи и напряжения в векторной форме имеют такой же характер изменения, как у двигателей постоянного тока. Данная система координат является неподвижной. Для построения САР удобно иметь дело с векторами, преобразованными из неподвижной системы координат в подвижную. Одну ось координат, называемую действительной, обозначают  $d$ , другую, называемую мнимой, обозначают  $q$  (рис. 70, б). Ось  $d$  располагают, как правило, вдоль вектора потока ротора. В этом случае оказывается, что поток двигателя можно поддерживать постоянным за счет регулирования проекции тока на ось  $d$ . Так как момент двигателя пропорционален произведению потока на ток, то при условии постоянства потока момент пропорционален проекции тока на ось  $q$ , т. е. для стабилизации момента можно регулировать составляющую  $I_q$ . Теперь после двух преобразований САР можно строить по аналогии с системами электроприводов постоянного тока.

САР с векторным управлением дают возможность управлять мгновенными значениями напряжений, токов и потока двигателя. Пример такой САР с частотно-токовым управлением будет описан при рассмотрении электропривода типа Размер 2М-5-2.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя, так же как для двигателя постоянного тока, выполняется двухзонным. До этого шла речь о регулировании частоты вращения вниз от номинальной с постоянным моментом. Во второй зоне происходит регулирование частоты вращения вверх от номинальной. Для регулирования в режиме постоянной мощности с постоянной перегрузочной способностью теоретически требуется одновременно с увеличением частоты

изменять напряжение на статоре по зависимости  $U/U_{ном} = \sqrt{f_1/f_{1ном}}$ . Однако для ряда приводов с диапазоном регулирования вверх 2:1 принято  $U = const$ . При этом режим постоянства мощности обеспечивается некоторым снижением величины перегрузочной способности относительно номинальной. Ограничение максимального напряжения питания двигателя позволяет выбрать элементы преобразователя на более низкое напряжение и получить лучшие массогабаритные показатели.

Электроприводы с частотным регулированием имеют более благоприятные переходные процессы (пуск, торможение и реверс) по сравнению с нерегулируемыми асинхронными электроприводами. Как известно, пусковой момент паспортной механической характеристики двигателя меньше критического. Пусковой ток превышает номинальный в 5—8 раз, а ток, соответствующий критическому моменту, в 3—3,5 раза. В частотно-регулируемых электроприводах обеспечивается частотный пуск, который заключается в следующем. Электропривод включается

на заданную частоту не сразу, а предварительно на частоту 1—5 Гц. Начальная частота выбирается таким образом, что точка критического момента соответствует нулевой частоте вращения, т. е. момент при пуске равен критическому. Далее частота питания плавно нарастает до заданного значения с таким темпом, чтобы двигатель разогнался по линии критических моментов. Соответственно увеличивается напряжение. Так как двигатель все время пуска работает с критическим моментом, то сокращается время пуска и пуск происходит с меньшим током, в результате чего сокращаются потери двигателя за время пуска. Преобразователь частоты обеспечивает также бесконтактный реверс. Не требуется переключения в силовой схеме контакторов, а изменяется порядок переключения силовых управляемых ключей благодаря соответствующему изменению работы системы управления инвертором.

Ряд электроприводов обеспечивает частотное рекуперативное торможение, во время которого энергия торможения двигателя передается в сеть. Другие типы электроприводов не имеют возврата (рекуперации) энергии торможения, но также обеспечивают эффективное торможение. При торможении одновременно с частотой плавно понижается напряжение.

Рассмотрим последний случай. Во время снижения частоты как при регулировании вниз, так и при торможении, в конденсатор фильтра через вентили обратного моста поступает энергия, отдаваемая двигателем. В результате повышается напряжение на конденсаторе фильтра, что опасно для элементов инвертора. Аналогичные процессы происходят при сбросе (уменьшении) нагрузки двигателя или отключении инвертора в результате действия защиты. Для предотвращения недопустимого повышения напряжения путем разряда энергии конденсатора служит цепочка из балластного резистора и транзисторного (или тиристорного) ключа, включаемого при повышении напряжения на конденсаторе сверх допустимой величины. Требуемый темп частотного пуска или торможения может регулироваться за счет обратных связей или определяться задатчиком интенсивности.

Кривая выходного напряжения ряда преобразователей имеет прямоугольно-ступенчатую форму, а асинхронные двигатели предназначены для питания синусоидальным напряжением. Питание двигателя прямоугольно-ступенчатым напряжением вызывает дополнительные потери и неравномерность вращения. Дополнительные потери двигателя и неравномерность вращения зависят от типа преобразователя частоты. Инверторы с формированием выходного напряжения по способу однократной коммутации вызывают заметные дополнительные потери, а на низких частотах — неравномерность вращения. Дополнительные потери вызывают ограничение допустимого по нагреву момента двигателя. Из-за существенной неравномерности вращения данный тип электропривода не применяяют в станочных приводах при диапазонах регулирования частоты вращения вниз от номинальной больше 1: (5÷10). Благоприятную форму выходного напряжения имеют инверторы с синусоидальной ШИМ. При соответствующем выборе несущей частоты ограничиваются дополнительные потери в двигателе и неравномерность его вращения.

Асинхронный короткозамкнутый двигатель имеет склонность к колебаниям частоты вращения на средних частотах. При питании двигателя от преобразователя частоты в разомкнутых системах электропривода это явление усиливается. Значительное влияние на величину колебаний двигателя имеют параметры силового фильтра на выходе выпрямителя. Для подавления колебаний в электроприводах применяются обратные связи.

Для механизмов прерывистого перемещения может быть использован шаговый режим асинхронного двигателя. Этот режим осуществляется при питании двигателя от инвертора, работающего на низкой частоте. Как известно, асинхронный двигатель на частотах ниже 5 Гц входит в шаговый режим из-за прямоугольно-ступенчатой формы тока. Преобразователь частоты состоит из выпрямителя и инвертора тока. Путем разного включения силовых ключей инвертора осуществляются различные комбинации подключения фаз двигателя к промежуточному звену постоянного тока. При этом получают разнообразные углы поворота двигателя. Для обеспечения требуемого угла поворота выбирается двигатель с определенным числом пар полюсов.

Описанные выше вопросы характерны для всех электроприводов с частотным управлением, устанавливаемых на металлообрабатывающих станках. Рассмотрим работу серийных асинхронных электроприводов, предназначенных для трехфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СЕРИИ ТПЧ

Преобразователи серии ТПЧ (ТПЧ-15, ТПЧ-40, ТПЧ-63-1) обеспечивают регулирование частоты питания трехфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей в диапазоне 5—60 Гц с соответствующим изменением напряжения от 20 до 230 В. Выходное номинальное линейное напряжение равно 220 В. Напряжение и частота стабилизируются с погрешностью  $\pm 2\%$ . Двигатели на напряжение 380/220 В подключаются к преобразователю с соединением обмоток по схеме «треугольник». Основные технические данные преобразователей приведены в табл. 6.

#### 6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ СЕРИИ ТПЧ

Параметр	ТПЧ-15	ТПЧ-40	ТПЧ-63-1
Номинальная выходная мощность, кВА	12	32	52
Номинальная мощность двигателя, кВт, не более	7,5	22	40
Номинальный КПД, %	0,8	0,8	0,9
Номинальный коэффициент мощности	0,8	0,8	0,85

Преобразователи частоты ТПЧ-15, ТПЧ-40, ТПЧ-63-1 содержат (рис. 71) сетевой понижающий трансформатор ТС, пускатель (ПМ) на его первичной стороне, быстродействующие предохранители (Пр) на вторичной стороне трансформатора, управляемый выпрямитель (УВ), фильтр (Ф), инвертор (ИН), мост обратных вентилей (ОМ), блоки системы управления выпрямителем (СУВ) и инвертором (СУИ), блок управления (БУ), блок коммутационной аппаратуры, блок питания, блок подзаряда конденсаторов

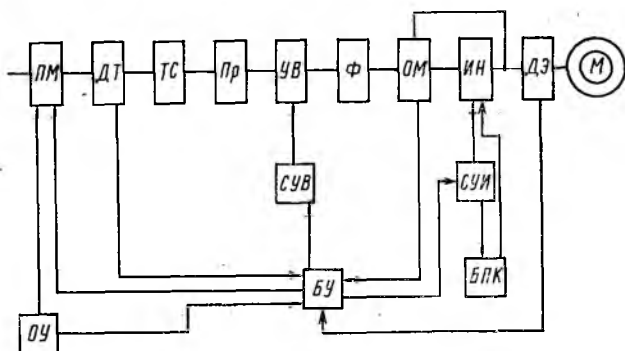


Рис. 71. Структурная схема преобразователей серии ТПЧ-40

(БПК), измерительные приборы, сигнальные лампы, органы управления (ОУ), датчики сетевого тока (ДТ) и ЭДС двигателя (ДЭ) [15].

САР, работающая по принципу, описанному выше, содержит обратную связь по внутренней ЭДС двигателя. Для датчика ДЭ используются трансформаторы напряжения и тока на выходе преобразователя. Управляющий сигнал САР через усилитель канала напряжения в блоке БУ воздействует на СУВ. Указанный усилитель в БУ имеет высокую стабильность работы, в том числе при колебании температуры. Преобразователь имеет местное (от потенциометра на двери шкафа) или дистанционное управление. Задающее устройство блока БУ управляет плавным изменением частоты и напряжения при частотном пуске или частотном нерекуперативном торможении. Возможны два варианта работы задающего устройства: первый — темп задается скоростью нарастания сигнала тахогенератора, сочлененного с асинхронным двигателем, второй — величинами резистора и конденсатора интегрирующей цепочки.

В БУ входит устройство защиты и сигнализации перегрузки. Сигнал перегрузки поступает с трансформаторов тока датчика ДТ на усилители «Перегрузка» и «Защита». При определенном уровне перегрузки первый усилитель включает реле и сигнальную лампу в режиме «мигания». На уровне, соответствующем току  $1,3 I_{ном}$ , срабатывает второй усилитель с выдержкой около 10 с, в результате посредством другого реле отключается ПМ. Во время пусков и переходных процессов действует токоограничение (отсечка по току). Сигнал первого усилителя («перегрузка») поступает на усилитель канала напряжения, способствуя ограничению выходного напряжения управляемого выпрямителя.

В системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель могут возникнуть автоколебания. Для их подавления служит устройство коррекции, осуществляющее гибкую обратную связь по току вентилей обратного моста. Сигнал снимается с резистора, включенного последовательно с ОМ. Выходной сигнал устройства воздействует на частоту инвертора через задающий генератор блока СУИ.

Выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме на шести тиристорах. Система управления работает по вертикальному принципу и содержит шесть каналов. Импульсы каналов сдвинуты на 60 эл. градусов между собой. При изменении напряжения управления на выходе фазосмещающего устройства регулируется фаза узкого импульса. Требуемая длительность выходного импульса СУВ образуется в устройстве формирования.

Инвертор напряжения с обратным мостом вентилей, с отсекающими вентилями, с коммутирующими дросселями в цепи постоянного тока между инвертором и ОМ представлен на рис. 63, а. Насыщающиеся дроссели, включенные последовательно с тиристорами инвертора, снижают скорость нарастания токов включения тириستоров.

Блок подзаряда коммутирующих конденсаторов обеспечивает напряжение не менее 200 В для заряда конденсаторов. Он имеет два источника постоянного тока для анодной и катодной групп рабочих тиристоров. В преобразователях ТПЧ-15 подзаряд производится через диоды, в остальных типоразмерах имеются подзарядные тиристоры, которые подсоединены к рабочим тиристорам инвертора. Импульсы на подзарядные тиристоры подаются от СУИ.

Блок системы управления инвертором содержит задающий генератор (см. рис. 67, б), импульсы которого через усилительный транзистор поступают на пересчетную схему (рис. 68, в, г).

Блоки питания (на рис. 71 не показаны) содержат три трехфазных трансформатора с отдельными трехфазными мостовыми выпрямителями для цепей СУВ, СУИ, БУ. Стабилизация некоторых источников обеспечивается установкой стабилизаторов. Первичные цепи трансформаторов блоков питания и БПК защищены предохранителями. При включении пускателя ПМ на выходе трансформатора ТС могут возникать перенапряжения, превышающие вдвое номинальное напряжение. Для ограничения этих перенапряжений вторичная обмотка ТС шунтирована цепями из последовательно включенных резисторов и конденсаторов.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ТИПА ПТЧКШ

Такие преобразователи предназначены для питания электрошпинделей с номинальными частотами 400, 800, 1600 Гц и мощностями соответственно 0,8—0,5 кВт. Диапазон плавного регулирования частоты вниз от номинальной 1:2 для каждого сменного электрошпинделя. Преобразователь содержит управляемый выпрямитель, охваченный отрицательной обратной связью по его выходному напряжению, LC-фильтр и автономный инвертор напряжения. Полууправляемый трехфазный мостовой выпрямитель шунтирован обратным вентилем. Система управления выпрямителем (СУВ) аналогична приводу ЭТЗ [1]. Инвертор (см. рис. 63, б) работает по принципу, описанному в разделе преобразователей частоты. Кроме коммутирующих дросселей, установленных последовательно с конденсаторами, имеется общий дроссель на входе инвертора.

Система управления преобразователем выполнена на элементах серии Логика-Т. Она состоит из задающего генератора, пересчетного кольца, формирователей импульсов (см. рис. 68, а, б), выходных усилителей импульсов и разделительных трансформаторов. Благодаря конденсатору на входе ЗГ осуществляется плавное изменение частоты при резких перемещениях переключателя. Выходные усилители импульсов управления тиристорами построены на элементах Т403 с импульсными трансформаторами. Параллельно их вторичным обмоткам установлены диод (для обеспечения прохождения только импульса положительной полярности) и конденсатор (для борьбы с помехами).

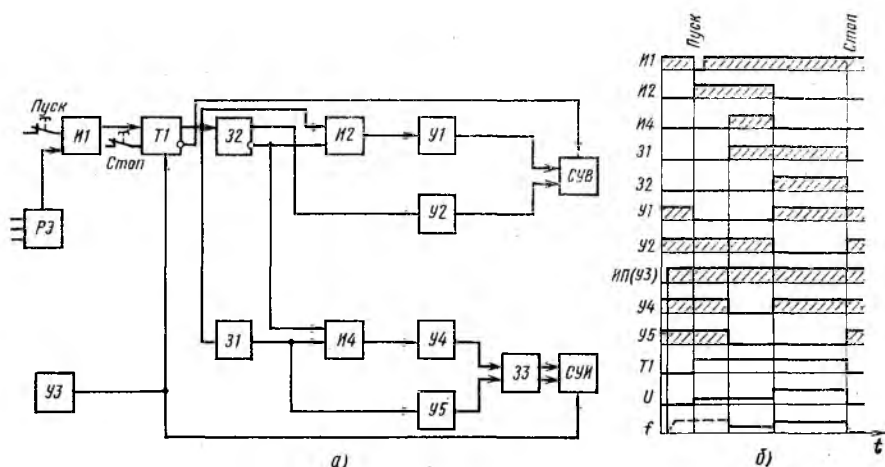


Рис. 72. Задающее устройство преобразователя серии ПТЧКШ:  
а — схема; б — диаграмма напряжений

Рассмотрим работу задающего устройства управления (рис. 72, а, б). На систему управления выпрямителем подается запрещающий сигнал от триггера  $TI$ . Через выдержку времени после включения автоматического выключателя усилитель  $У3$  подает сигнал установки триггеров и задающего генератора в исходное положение. Усилители  $У4$  и  $У5$  закрыты, при этом задающий генератор обеспечивает выходную частоту системы управления инвертором, равную номинальной. Если управляемый выпрямитель правильно подключен к фазам сети, то релейный элемент ( $PЭ$ ) выдает разрешающий сигнал на элемент  $И1$ .

Через 1,5–2 с после включения автоматического выключателя, установленного в силовой схеме, система управления готова к пуску. При воздействии на кнопку «Пуск» переключается триггер  $TI$  и через элемент  $И2$  открывается  $У1$ , который выдает на  $СУВ$  задающий сигнал, определяющий выходное напряжение преобразователя, равное  $0,2 U_{ном}$ . Одновременно от  $TI$  снимается запрет включения  $СУВ$ . На двигатель подается номинальная частота и напряжение  $0,2 U_{ном}$ , что обеспечивает минимальный ток двигателя и облегченный запуск преобразователя. Через 3 с после нажатия кнопки «Пуск» срабатывает задержка  $З1$ , открываются  $У4$  и  $У5$ , в результате выходная частота снижается до  $0,3 f_{ном}$ . Двигатель разгоняется до частоты вращения  $0,3 n_{ном}$  за 2–3 с. Через 6 с после нажатия кнопки «Пуск» срабатывает  $З2$ , открывается  $У2$ , закрывается  $У1$ .  $СУВ$  выдает импульсы, задающие установленную величину выходного напряжения. Одновременно закрывается  $У4$ , что приводит к увеличению частоты задающего генератора  $СУИ$  и соответственно выходной частоты преобразователя (до установленной). В результате двигатель разгоняется до частоты вращения, определяемой задатчиком. После нажатия кнопки

«Стоп» переключается *T1*, выключается выпрямитель, система управления приходит в исходное положение. *У4* управляется через *И4*. *З3* обеспечивает передачу управляющего сигнала на *ЗГ* с некоторой инерционностью.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СЕРИИ ПЧ-4-200 И ПЧ-3,5-3200

Преобразователи служат для управления асинхронными двигателями мощностью  $0,55 \div 2,2$  и  $0,3 \div 2,2$  кВт. Преобразователи первого типа имеют выходные номинальные частоты 50 и 100 Гц, а вторые — 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 1920, 2400 и 3200 Гц. Диапазон плавного регулирования частоты вращения ПЧ-4-200 (см. каталог «Преобразователь частоты ПЧ-4-200У4 ЛК 05.09.04—79») составляет 1:10 вниз и 2:1 вверх от номинальной величины. В обозначение преобразователей входят: номинальная выходная мощность (кВА) и максимальная частота (Гц). Преобразователи частоты ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200 (см. каталог «Преобразователь частоты ПЧ-3,5-3000У4 ЛК 05.73-02—80») обеспечивают следующие технические характеристики. Частотный пуск от преобразователя ПЧ-4-200 при суммарном моменте инерции, приведенном к валу двигателя и равном полуторакратному моменту инерции двигателя, и статическом моменте нагрузки, равном половине от номинального, происходит за время не более 6 с (до максимальной частоты). Частотный пуск ненагруженных электрошпинделей от преобразователя ПЧ-3,5-3200 происходит за 8 с до номинальной частоты, частотное торможение — за время не более 5 с в первом случае и 8 с во втором. Отклонение частоты вращения при колебаниях момента нагрузки от нуля до длительно допустимой величины составляет не более  $\pm 5\%$  от установленного значения для диапазона частот 0,2—2 от номинальной (преобразователь ПЧ-4-200). Отклонение выходной частоты от установленной равно не более 2% при колебаниях тока нагрузки, температуры окружающего воздуха и напряжения питающей сети (ПЧ-3,5-3200). Выходное номинальное напряжение преобразователей 220 В.

В течение 60 с допускается следующая кратность перегрузки по току: 1,2 (преобразователь ПЧ-4-200) и 1,25 (ПЧ-3,5-3200). Преобразователь ПЧ-4-200 может управлять сменными электродвигателями 4А, 4АП на 50 Гц или 4АШ на 100 Гц, а ПЧ-3,5-3200 — электрошпинделями на номинальные частоты, указанные выше. Так как двигатели единой серии 4А самовентилируемые, то с регулированием частоты вращения вниз от номинальной снижается длительно допустимый по нагреву момент. Кроме того, уменьшается упомянутая выше величина момента двигателя из-за потерь, обусловленных несинусоидальностью выходного напряжения преобразователя. Преобразователи ПЧ-4-200 позволяют реверсировать двигатели.

Преобразователи ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200 выполнены по схеме с промежуточным звеном постоянного тока (рис. 73, а, б) и содер-





жат управляемый выпрямитель ( $УВ$ ) и автономный инвертор напряжения (ИН) с обратным мостом ( $ОМ$ ), а также сглаживающий фильтр ( $\Phi$ ), состоящий из дросселя  $L$  и конденсатора  $C_{\Phi}$ . Кроме того, имеются ограничитель напряжения, короткозамыкающий тиристор  $V21$ , устройства защиты, органы управления и сигнализации. На входе преобразователя находятся автоматический выключатель  $QF$  и силовой понижающий трансформатор  $TV$ .

Выпрямитель на оптронных тиристорах выполнен по трехфазной полууправляемой схеме. Тиристоры ( $V16 \dots V18$ ) анодной группы (их аноды объединены между собой) управляются по фазовому принципу. Тиристоры ( $V13 \dots V15$ ) катодной группы управляются в режиме «включено — отключено» и служат для бесконтактного отключения преобразователя от сети при срабатывании различных защит. Параллельно тиристорам соединены защитные цепи, состоящие из последовательно включенных резистора и конденсатора.

Трехфазный мостовой инвертор состоит из шести транзисторных ключей ( $V1 \dots V12$ ). Длительность проводимости ключей по 180 эл. градусов. Транзисторный ключ представляет собой семь параллельно соединенных транзисторов типа КТ812А и один управляющий ими транзистор того же типа. Последовательно с эмиттерами силовых транзисторов включены уравнивающие резисторы (см. рис. 60, а). В ключ входит вентиль обратного моста и цепочка из конденсатора, диода и резистора, соединенная параллельно транзисторам. Работа инвертора соответствует описанию, представленному выше, в разделе преобразователей частоты.

Каждый канал системы фазового управления выпрямителем (СУВ) [3] содержит интегратор, на входе которого алгебраически суммируются управляющее ( $U_p$ ) и синхронизирующее напряжения. Последнее пропорционально линейному напряжению сети. Во время отрицательного полупериода напряжения сети суммированное напряжение интегрируется. Во время положительного полупериода положительное напряжение интегратора снижается и при достижении им нуля срабатывает компаратор. В этот момент вырабатывается импульс на отпирание тиристора. Фаза импульса зависит от величины  $U_p$ . На тиристоры нерегулируемой группы подаются импульсы длительностью 120 эл. градусов.

На рис. 74, а, б даны схемы системы управления инверторами (СУИ) преобразователей ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200. Распределитель импульсов (РИ) преобразователя ПЧ-3,5-3200 построен по кольцевой пересчетной схеме на триггерах. РИ имеет на выходе шестифазную систему импульсов длительностью по 180 эл. градусов. Регистр, построенный на триггерах, выдает систему импульсов, сдвинутых на интервал тактового импульса относительно импульсов РИ. Этот сдвиг обеспечивает коммутационную паузу между двумя ключами противоположной полярности каждой фазы инвертора. Переключатель диапазонов (ПД) преобразователей обоих типов изменяет частоту  $3Г$  в соответствии с положением переключателя номинальных частот и формирует тактовые импульсы

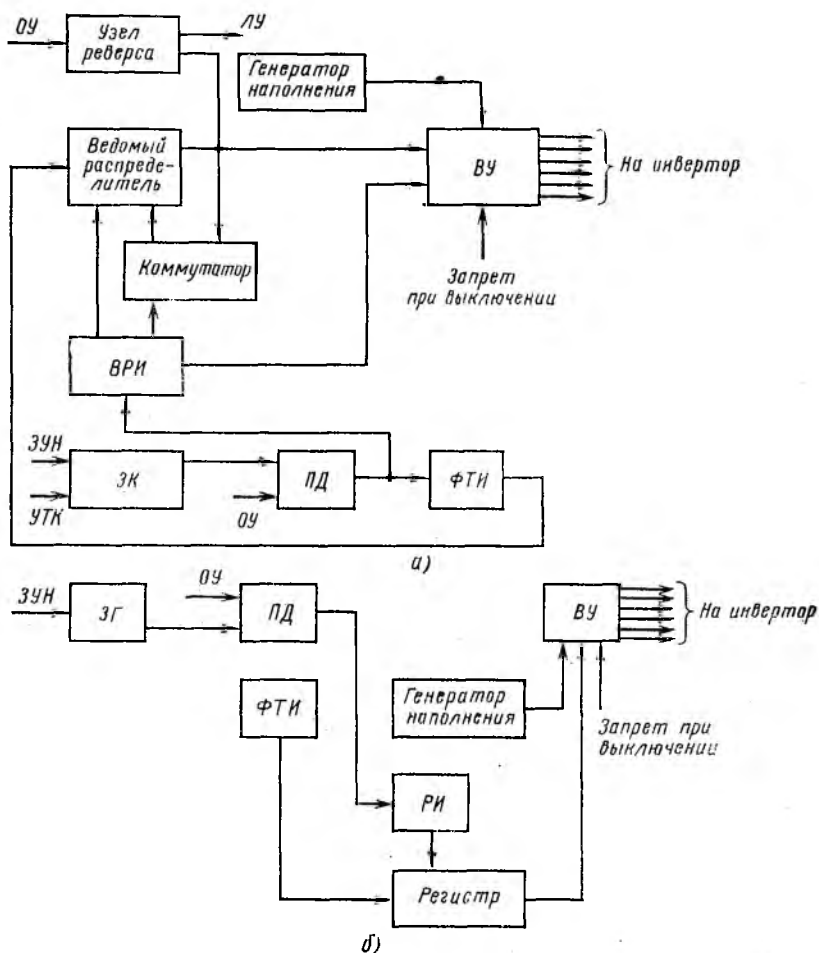


Рис. 74. Схемы системы управления инвертором преобразователей серии ПЧ:  
 а — ПЧ-4-200; б — ПЧ-3,5-3200

(ФТИ) (время тактового импульса равно интервалу коммутационной паузы между выключением одного и включением другого транзисторного ключа фазы инвертора). Блок управления инвертором преобразователя ПЧ-4-200 (рис. 74, а), кроме описанных уже узлов, содержит следующие. Ведущий распределитель импульсов (ВРИ) формирует шестифазную систему импульсов длительностью 180 эл. градусов. Коммутатор импульсов распределителя переключает импульсы двух фаз в прямой или обратной последовательности по команде узла реверса. Ведомый распределитель импульсов формирует последовательности импульсов, сдвинутые на интервал тактового импульса относительно импульсов ВРИ и коммутатора импульсов распределителя. Узел реверса со-

храняет команду «Вперед» или «Назад», подает сигнал к пуску, а в случае реверса следующую последовательность сигналов: торможение, изменение чередования фаз инвертора и разгон в новом направлении. При срабатывании любой из защит при выключении преобразователя (обоих типов) на формирователи импульсов выходных усилителей (ВУ) поступает запрещающий сигнал.

Рассмотрим работу общей системы управления преобразователем (см. рис. 73, б). Начнем с органов управления (ОУ). Переключатели выбирают величину номинальной частоты и заданной частоты вращения. Кнопки управляют пуском в прямом или обратном направлении (ПЧ-4-200), частотным торможением или остановом без торможения.

Логическое устройство (ЛУ) (см. рис. 73, в) в соответствии с командами кнопок и устройств защиты управляет режимами работы преобразователя. Логическое устройство включает в себя триггеры пуска, защиты и торможения. Режим «Выключено» имеет место после включения вводного автомата или при воздействии на кнопку «Стоп» либо в результате завершения процесса торможения. При этом триггер пуска (ТП) имеет состояния выходов 0/1, триггер защиты (ТЗ) — 1/0, а триггер торможения (ТТ) — произвольное. В результате воздействия на кнопку «Пуск» (ПЧ-3,5-3200) или «Вперед» либо «Назад» (ПЧ-4-200) логическое устройство непосредственно (ПЧ-3,5-3200) или через узел реверса СУИ (см. рис. 74, а, и штрихпунктир на рис. 73, б) переключается в состояние «Работа». При этом триггер пуска переходит в положение 1/0, а триггер торможения — 0/1. После нажатия кнопки «стоп» или срабатывания защиты ЗПР триггер ТП переходит в положение 0/1. Схема переходит в режим «Выключено». Если оператор воздействовал на кнопку «Торможение», то устройство переключается в режим «Торможение», а триггер торможения в положение — 1/0. После завершения торможения триггер пуска переходит в положение 0/1, соответствующее режиму «Выключено».

В случае срабатывания одной из защит (ЗКЗ, ЗСН, ЗНЧФ или ЗПР) устанавливается состояние триггера ТЗ—0/1 и после воздействия на кнопки «Вперед» или «Назад» преобразователь не переходит в режим «Работа». После ликвидации причины, приведшей к включению устройства защиты, необходимо нажать кнопку «Стоп», в результате чего схема переходит в исходное состояние. Кроме того, логическое устройство управляет лампами сигнализации. Указанным выше режимам соответствуют следующие состояния ламп: «Включено» — лампа «Работа» горит в полномала; «Работа» — лампа горит непрерывно; «Аварийное отключение» — лампа «Работа» мигает. Преобразователь имеет реле (К1), контакт которого подает сигнал в схему электроавтоматики станка о включенном состоянии преобразователя. Задатчик управляющего напряжения (ЗУН) формирует управляющее напряжение, пропорциональное заданной частоте (частоте вращения), плавное повышение или снижение этого сигнала при разгоне, регулировании и

торможении. Последнее обеспечивается задатчиком интенсивности (интегратором). При аварийном отключении или останове кнопкой «Стоп» управляющее напряжение снимается.

Система автоматического регулирования напряжения преобразователя ПЧ-3,5-3200 построена по принципу пропорционально-интегрального регулятора. Кроме управляющего напряжения (от задатчика ЗУН) на вход усилителя регулятора напряжения (РН) приходит сигнал обратной связи по напряжению выпрямителя ( $U_d$ ) от датчика напряжения (ДН). На один из входов усилителя регулятора напряжения преобразователя ПЧ-4-200 подается дополнительно  $U_d$  через дифференцирующую RC-цепочку. Регулятор ПЧ-4-200 кроме стабилизации  $U_d$  подавляет автоколебания. Регулятор напряжения обеспечивает ограничение выходного напряжения преобразователя на уровне номинального при повышении частоты выше номинальной.

В схеме преобразователя ПЧ-3,5-3200 предусмотрена компенсация падения выходного напряжения на силовых элементах (дросселе и транзисторах). Для этого усилитель устройства токовой коррекции (УТК) автоматически обеспечивает увеличение управляющего напряжения на 2%. Входной сигнал на усилитель подается с шунта  $R_{ш}$ , датчика тока (ДТ), измеряющего ток инвертора. В преобразователе ПЧ-4-200 компенсируется также падение напряжения в сопротивлении статора. В этом преобразователе имеется положительная токовая обратная связь, воздействующая на канал частоты (задающий генератор в СУИ).

Ограничитель напряжения (ОН) содержит резистор  $R_6$  и транзисторный ключ  $V_{20}$ . Он включается при уменьшении частоты в режимах торможения и регулирования ее вниз (подтормаживание), при сбросе нагрузки и выключении инвертора в случаях срабатываний защит и отключений преобразователя. Транзисторный ключ включается в импульсном режиме. В резисторе рассеивается энергия торможения двигателя. Устройство управления ограничителем напряжения (УОН) содержит компаратор, который срабатывает при превышении выходным напряжением  $U_d$  уровня 1,1 от установленного значения.

Преобразователь содержит несколько устройств защиты. Одно из них — от перегрузки по току и короткого замыкания на выходе преобразователя, и, кроме того, от аварии в инверторе (ЗКЗ). Сигнал с шунта, измеряющего ток инвертора, поступает на компаратор. При превышении током установленной величины срабатывает компаратор. Устройство защиты от недопустимого снижения напряжения или обрыва фазы питающей сети (ЗСН) содержит датчик напряжения сети (в виде делителя из резисторов). При снижении напряжения сети от номинальной величины на 15—20% или при обрыве фазы сети переключается логический элемент, что происходит практически без запаздывания. После срабатывания логического элемента система управления преобразователя еще некоторое время получает питание, так как ее источники питания имеют конденсаторные фильтры.

В результате срабатывания одной из описанных выше защит включается короткозамыкающий тиристор  $V21$  ( $K3$ ). Благодаря этому сокращается время протекания чрезмерного тока через силовые транзисторы инвертора, которые шунтируются указанным тиристором. Образуется короткозамкнутая цепь на выходе выпрямителя и срабатывает автоматический выключатель. Происходит аварийное отключение преобразователя.

В устройство защиты от неправильного чередования фаз ( $ЗНЧФ$ ) (см. рис. 73, в) поступают сигналы с детекторов полярности фаз  $B$  и  $C$  ( $ДВ$  и  $ДС$ ). Формирователь импульсов ( $ФИ$ ) формирует из сигнала фазы  $B$  короткий импульс. При неправильном чередовании этот импульс совпадает с импульсом следующей фазы и триггер защиты логического устройства переключается в аварийное состояние.

Имеется защита от обрыва резистивного задатчика ( $ЗОЗ$ ). При ее срабатывании триггер торможения логического устройства переходит в положение, равнозначное режиму торможения. При выходе из строя транзисторов ограничителя напряжения могут перегреться резисторы, соединенные последовательно с ними. В этом случае увеличится сопротивление терморезистора, соединенного последовательно с кнопкой «Стоп». Это — устройство защиты от перегрева резисторов ( $ЗПР$ ).

Блок питания ( $БП$ ) содержит трансформатор, выпрямители и стабилизаторы напряжения  $+15$  и  $-15$  В. Вторичные обмотки используют для синхронизации с сетью системы фазового управления выпрямителем и питания формирователей импульсов управления инвертором.

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ СЕРИИ ЭКТ (ЭКТР)

Электроприводы выпускают в двух модификациях, обладающих режимом частотного пуска с регулируемым темпом. Электроприводы ЭКТР обеспечивают рекуперативное торможение. Кроме того, электроприводы разделяются по номинальной выходной частоте, причем электроприводы с номинальными частотой 50 Гц и напряжением 380 В имеют рабочий диапазон регулирования частоты 5—80 Гц и диапазон максимального изменения частот 1—90 Гц. Электроприводы с номинальными частотой 200 Гц и напряжением 220 В характеризуются соответственно диапазонами 15—250 и 5—250 Гц. У низкочастотных электроприводов (ЭКТ-20/380, ЭКТ-63/380, ЭКТ-100/380) КПД находится в пределах от 0,9 до 0,93 (для разных типоразмеров), а коэффициент мощности принимает значения 0,15—0,95 (для разных режимов работы). У высокочастотных электроприводов (ЭКТ-50/220, ЭКТ-100/220, ЭКТ-160/220, ЭКТ-250/220) эти параметры составляют от 0,85 до 0,9. Среди выпускаемых электроприводов имеются типоразмеры со следующими номинальными мощностями:

Типоразмер	Мощность, кВА
ЭКТ-50/220 . . . . .	19
ЭКТ-100/220 . . . . .	38
ЭКТ-160/220 . . . . .	61
ЭКТ-250/220 . . . . .	95
ЭКТ-20/380 . . . . .	13
ЭКТ-63/380 . . . . .	41
ЭКТ-100/380 . . . . .	66

Те же мощности имеют электроприводы ЭКТР. Допускается перегрузка по току кратностью два (по отношению к номинальной величине) в течение 10с для электропривода на номинальное напряжение 380 В и 1,5/120с для электропривода на напряжение 220 В. Нестабильность частоты не более  $\pm 0,5\%$  [12].

Электропривод (рис. 75) включает в себя управляемый выпрямитель, инвертор, ведомый сетью, ИВС для ЭКТР, которыми управляет система управления СУВ с датчиком запирания мостов (ДЗМ), фильтр, устройство силового токоограничения (СТ), инвертор напряжения (ИН) с источником подзаряда конденсаторов (ИПК) и системой управления СУИ, обратный мост вентилей ОМ, систему защиты и сигнализации (СЗС) с датчиком входного

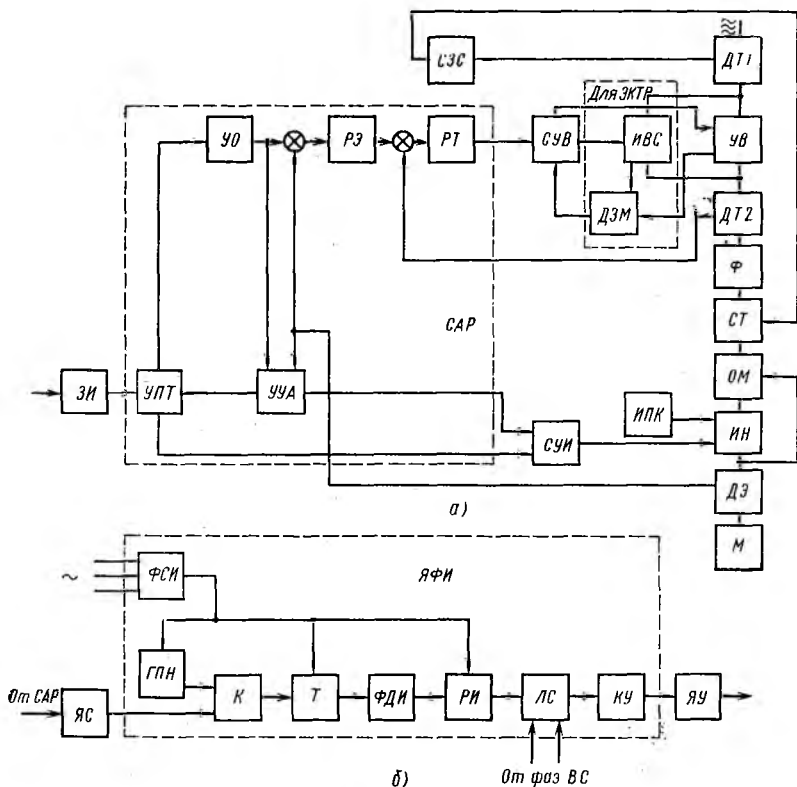


Рис. 75. Структурная схема электропривода серии ЭКТ (а) и схема системы управления выпрямителем ЭКТ (б)

тока (*ДТ1*) выпрямителя, *САР* с датчиками *ДТ2* и *ДЭ*. Электроприводы с выходным номинальным напряжением 220 В содержат понижающий (согласующий) трансформатор, а с напряжением 380 В — токоограничивающие реакторы (дрессели). Параллельно тиристорам инвертора установлены защитные цепи из вентиля, резистора и конденсатора. *УВ* и *ИВС* представляют собой тиристорные полностью управляемые трехфазные мосты, включенные встречно-параллельно по схеме раздельного управления.

Электроприводы допускают управление от местного или дистанционного пульта. Блок системы управления выпрямителем *СУВ* (рис. 75, б) содержит следующие ячейки: питания, согласования (*ЯС*), формирователей импульсов (*ЯФИ*) и усилителей (*ЯУ*). Каждая из трех ячеек формирователей образует импульсы для отпирания тиристоров одной фазы выпрямителя. Ячейка формирователей импульсов (*ЯФИ*) включает в себя следующие функциональные узлы: формирователь синхронизирующих импульсов, генератор пилообразного напряжения (*ГПН*), компаратор (*К*), триггер, формирователь длительности импульсов (*ФДИ*), распределитель импульсов, ключевые усилители импульсов (*КУ*). На вход формирователя синхронизирующих импульсов поступает трехфазное синусоидальное напряжение. Этот формирователь синхронизирует *ГПН*, триггер и распределитель импульсов. Схема обеспечивает симметрию (идентичность) импульсов *ГПН* разных каналов. Импульсы *ГПН* подаются на компаратор, который срабатывает в момент равенства пилообразного напряжения и напряжения управления. При этом переключается триггер и формируются импульсы длительностью 0,5 мс. Распределитель передает импульсы по противофазным каналам. Затем в узле *ЛС* происходит логическое сложение импульсов данного и следующего по фазировке канала. Сдвоенные импульсы предварительно усиливаются и поступают через ячейку усилителей на первичные обмотки импульсных трансформаторов. Напряжение управления зависит от выходного сигнала регулирования и задания начального угла регулирования. Сигнал управления вырабатывается операционным усилителем. Угол управления ограничивается по минимуму и по максимуму.

Система автоматического регулирования (рис. 75, а) содержит регулятор тока (*РТ*), регулятор ЭДС (*РЭ*), усилитель-ограничитель (*УО*) и усилитель постоянного тока (*УПТ*), устройство устранения автоколебаний (*УУА*) и задатчик интенсивности (*ЗИ*). *САР* через *ЗИ* управляет пуском, торможением и реверсом с регулируемым темпом. Система регулирования имеет два канала стабилизации: напряжения (ЭДС) и частоты. Полярность задающего напряжения на входе *САР* определяет направление вращения и соответствующие сигналы («Вперед» или «Назад»), выдаваемые системой автоматического регулирования в систему управления инвертором. Электропривод имеет двухзонное регулирование частоты вращения: При частотах вращения ниже номинальной отношение ЭДС к частоте поддерживается постоянным. При регули-

ровании частоты вращения выше номинальной ЭДС двигателя остается постоянной. Двухконтурная САР содержит внутренний контур стабилизации выходного тока преобразователя частоты и внешний — ЭДС двигателя. Регуляторы  $PT$  и  $PЭ$  работают по пропорционально-интегральному принципу.  $PT$  позволяет ограничить выходной ток преобразователя. Регуляторы выполнены на операционных усилителях.

Если во время переходных процессов (разгоне и торможении) отношение ЭДС двигателя к частоте отличается от постоянного, то прекращается рост сигнала  $ЗИ$ . В результате становятся постоянными выходные частота и напряжение инвертора. После того как указанное выше отношение приблизится к постоянному, сигнал задатчика интенсивности вновь начинает линейно изменяться. Благодаря такой коррекции ограничивается рост напряжения на конденсаторе фильтра при торможении. На вход устройства устранения автоколебаний подается сигнал, пропорциональный ЭДС двигателя. Выходное напряжение  $УУА$  поступает на задающий генератор. Благодаря изменению частоты инвертора устраняются автоколебания в системе преобразователь частоты — двигатель. В установившемся режиме, если увеличивается ток двигателя (снижается ЭДС), то  $УУА$  воздействует на уменьшение частоты. При сбросе нагрузки выходная частота увеличивается. Таким образом, устройство способствует стабилизации отношения ЭДС к частоте.

Система защиты и сигнализации ( $СЗС$ ) выдает команды на включение и отключение преобразователя, выполняет функции защиты, контроля и сигнализации. При коротком замыкании (срыве) инвертора протекает большой ток разряда силового фильтра через анодный и катодный тиристоры одной фазы инвертора. При этом по сигналу датчика срыва инвертора, установленного последовательно в звене постоянного тока, срабатывает силовое токоограничение, снимаются выходные импульсы  $СУИ$ , отключается вводной автомат, имеющий дистанционное управление. Параллельно соединенные тиристоры силового токоограничения разряжают энергию конденсатора фильтра через дроссели (выполняют функцию короткозамыкателя). Благодаря этому защищаются тиристоры инвертора. После устранения короткого замыкания снимается сигнал датчика срыва инвертора и происходит автоматическое повторное включение вводного автомата и соответственно электропривода. При кратковременном исчезновении или снижении (ниже  $0,85 U_{ном}$ ) напряжения сети также снимаются выходные импульсы  $СУИ$  и отключается вводной автомат. Подобным же образом выключается электропривод от кнопки «Выкл.». Если напряжение сети восстановится за время менее 1,5 с, то произойдет автоматическое повторное включение.

Если входной ток, потребляемый преобразователем из сети (датчик  $ДТ1$ ), превосходит уровень уставки ( $ЗI_{ном}$ ), то снимаются задающий сигнал и выходные импульсы  $СУИ$ , включается силовое токоограничение и отключается вводной автомат. Как только



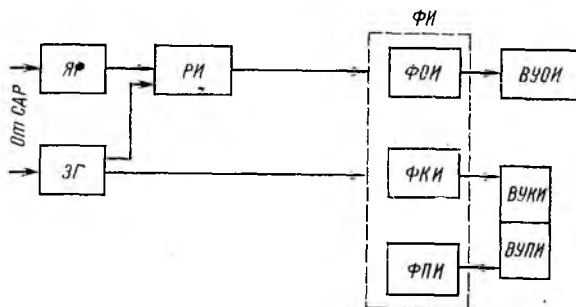


Рис. 76. Схема системы управления инвертором электропривода серии ЭКТ

начинает срабатывать защита, зажигается лампа «Максимальная защита». Кроме того, имеется тепловая защита, которая отключает электропривод (таким же способом, как и в предыдущем случае), когда входной ток электропривода в продолжение 10 с превышает допустимую величину. На срабатывание защиты указывает загорание лампы «Перегрузка». В обоих случаях для повторного пуска электропривода надо отключить автомат напряжения цепи управления и вновь включить его. Так же работает защита, если прекращается принудительный обдув силовых тиристоров (зажигается лампа «Нарушение охлаждения вентиля»). В случае исчезновения фазы напряжения сети на время более 1,5 с электропривод выключается (загорается лампа «Исчезновение напряжения»). Искусственный срыв инвертора создается, если выходное напряжение преобразователя превышает уровень  $1,2 U_n$ . Блок питания содержит трансформатор, выпрямительные мосты, емкостные фильтры, предохранители. СУВ питается от стабилизированных источников, при повышении нагрузки ограничивается ток стабилизатора.

Система управления инвертором (рис. 76) состоит из ЗГ (размещенного в блоке регулирования), блока управления инвертором и выходных усилителей (установленных в силовых блоках). ЗГ работает на основе перезаряда колебательного контура. При равенстве сигнала задания нулю начальная частота ЗГ  $1 \div 1,5$  Гц. Задающий генератор управляется от блока регулирования. Выход ЗГ соединен с распределителем импульсов и формирователем длительности импульсов (ФИ). Распределитель импульсов кольцевого типа является реверсивным счетчиком, который выдает шестифазную последовательность импульсов длительностью 60 эл. градусов. Изменение порядка чередования импульсов РИ управляется от САР (блока регулирования) через ячейку реверса (ЯР). ЗГ подает сигнал разрешения реверса после снижения его частоты до начальной.

Формирователь импульсов образует три системы импульсов.

Первая — шестифазная система широких импульсов служит для управления основными тиристорами (ФОИ), их длительность равна 180 эл. градусов минус интервал коммутационной паузы.

Вторая — система, состоящая из двух последовательностей узких импульсов, предназначенная для управления подзарядными тиристорами (ФПИ). Эти импульсы имеют частоту в 3 раза больше выходной. Последовательности импульсов сдвинуты между собой на половину своего периода. Третья шестифазная система узких импульсов — для управления коммутирующими тиристорами (ФКИ), их длительность равна сумме интервала коммутационной паузы и длительности импульса подзарядного тиристора. Передний фронт импульса подзарядного тиристора совпадает с началом основного. Импульс коммутирующего тиристора длится все время коммутационной паузы и последующего интервала импульса подзарядного тиристора. Импульсы основных тиристоров через выходные усилители основных (широких) импульсов (ВУОИ), а импульсы коммутирующих и подзарядных тиристоров через выходные усилители узких импульсов (ВУКИ и ВУПИ) поступают в силовую схему. Выходные усилители содержат разделительные трансформаторы.

#### СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ ТИПА РАЗМЕР 2М-5-2

Электропривод имеет номинальные моменты от 7 до 47 Н·м и обеспечивает работу в четырех квадрантах механических характеристик [2]. Номинальная частота вращения 500, максимальная частота вращения 1000 об/мин. Электропривод обеспечивает в переходных процессах максимальный момент, равный  $M_{ном}$  в диапазоне от  $n_{max}$  до  $n_{ном}$ , и момент  $2 \cdot M_{ном}$  — от  $n_{ном}$  до 0. При превышении указанной перегрузки электропривод отключается за 0,5 с. Двигатели имеют встроенные датчики температуры. Электропривод имеет векторную САР и работает по принципу частотно-токового управления.

Из системы ЧПУ на вход привода (рис. 77) поступает сигнал  $U_{3\omega}$ , задающий частоту вращения. Вычитание сигнала обратной связи по частоте вращения из указанного сигнала напряжения выполняется в регуляторе скорости (РС). РС построен по принципу пропорционально-интегрального регулирования. Регулятор скорости формирует сигнал  $U_q$ , задающий ток  $I_2$  и частоту ротора

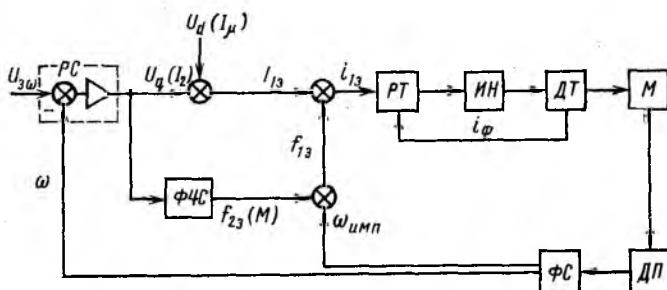


Рис. 77. Структурная схема электропривода серии Размер 2М-5-2

$f_{23}$  посредством формирователя частоты скольжения  $\Phi ЧС$  (частота скольжения пропорциональна частоте ротора). Причем последний параметр устанавливает момент двигателя. Сигнал  $U_q$  поступает на два канала. В первый канал подается также сигнал  $U_d$ , обуславливающий ток намагничивания  $I_\mu$  и соответственно поток двигателя. В первом канале вырабатывается сигнал, определяющий величину тока статора  $I_{13}$  по  $I_\mu$  и  $I_2$ .

Во втором канале сложение упомянутого выше сигнала  $f_{23}$  и напряжения обратной связи по частоте вращения  $\omega$  создает сигнал, устанавливающий частоту тока статора  $f_{13}$ . Затем эти оба канала, соединяясь, формируют заданную синусоидальную кривую тока статора  $i_{13}$  заданной амплитуды и частоты, поступающую на регулятор тока ( $РТ$ ). На  $РТ$  приходит также сигнал обратной связи по току статора  $i_{1ф}$  от датчика тока  $ДТ$ . Сигнал  $РТ$  подается на транзисторный инвертор  $ИН$ . В нуль-органе регулятора тока сравниваются мгновенные значения заданной  $i_{13}$  и фактической  $i_{1ф}$  величин тока статора. Регулятор работает по релейному принципу, т. е. сигнал управления силовой частью (инвертором) изменяется не непрерывно, а скачкообразно при достижении определенной разницы указанных выше величин. Если фактический ток больше заданного (на обусловленное значение), то вырабатывается сигнал включения определенного транзисторного ключа. Фаза двигателя подключается к шине звена постоянного тока такой полярности, что фактический ток начинает снижаться. Фактический ток сначала станет равным заданному, а затем становится меньше его. Когда разница токов опять достигнет обусловленного значения (но теперь другого знака), то поступит сигнал на включение другого ключа инвертора. Фаза двигателя подсоединяется к шине противоположной полярности. Таким образом, фактическая кривая тока пойдет вверх, пересечет кривую заданного тока. Такое пересечение будет происходить регулярно, т. е. фактический ток будет изменяться по ломаной линии, периодически пересекающей кривую заданного тока. В результате благодаря тока. Такое пересечение будет происходить регулярно, т. е. фактический ток имеет форму, близкую к синусоидальной. Регулятор тока имеет два аналогичных канала для двух фаз; в третьем канале — заданный и фактический токи фазы образуются путем суммирования сигналов первых двух фаз.

Система управления вырабатывает коммутационные паузы между выключением одного и включением другого транзисторного ключа каждого плеча моста инвертора. Это позволяет исключить сквозные токи. Переключение ключей разной полярности во всех фазах осуществляется одновременно.

Так как привод является следящим, то на валу двигателя установлен датчик положения ( $ДП$ ), в данном случае типа «фазовращатель». Фазовращатель питается напряжением с частотой 2 кГц. Выходное синусоидальное напряжение фазовращателя тоже частотой 2 кГц имеет фазовый сдвиг относительно напряжения питания. Этот сдвиг пропорционален текущему углу положения

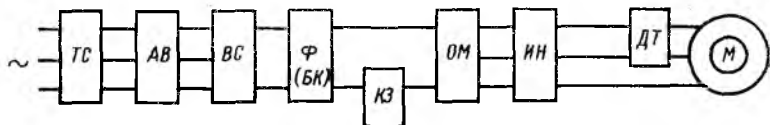


Рис. 78. Схема электропривода серии Размер 2М-5-2

ротора фазовращателя. Выходное напряжение фазовращателя преобразуется в импульсный вид. Датчик частоты вращения отсутствует. Сигнал обратной связи по частоте вращения образуется в формирователе  $\Phi С$  в результате обработки сигнала фазовращателя. Причем сигнал частоты вращения в импульсном виде используется для сложения с частотой тока ротора  $i_{23}$ , а в аналоговом виде он вычитается из задающего сигнала  $U_{3\omega}$ . При этом аналоговый сигнал скорости формируется из промежуточного сигнала, имеющего вид кода, посредством цифроаналогового преобразователя.

Структурная схема силовой части электропривода содержит (рис. 78) сетевой понижающий трансформатор (ТС) с автоматическим выключателем на вторичной стороне, неуправляемый выпрямитель (ВС), емкостный фильтр (БК) и транзисторный инвертор напряжения (ИН), работающий на частоте коммутации порядка 3 кГц. Ключи трехфазного мостового инвертора состоят из пяти параллельно включенных транзисторов, управляющего транзистора, соединенного с основными по схеме составного транзистора, и вентиля обратного моста (ОМ). В эмиттерных цепях транзисторов находятся предохранители, которые их защищают от длительной перегрузки. Ключи включают в себя цепочки из резисторов, дросселей, конденсаторов и диодов, защищающие транзисторы от перенапряжений и сквозных токов. Такие цепи описаны в разделе силовых транзисторов (см. рис. 60, б). В данном случае также благодаря обратной связи поддерживается падение напряжения коллектор-эмиттер на уровне 3,5 В.

Выходные усилители системы управления обеспечивают подачу отрицательного напряжения на базы силовых транзисторов в непроводящие интервалы времени. Последовательно между конденсаторным фильтром и инвертором установлены шунт и транзисторный защитный ключ (КЗ). Сигнал с шунта управляет этим ключом. Ключ запирается (разрывает цепь) при достижении током величины 60 А, осуществляя быстродействующую защиту силовых транзисторов инвертора. При этом ток нагрузки замыкается через вентиль. Кроме того, электропривод имеет следующие виды контроля отдельных блоков: функционирование датчиков тока, источников питания фазовращателя и выходных усилителей; уровень напряжения и допустимого тока нагрузки источников питания системы управления. Обеспечивается защита двигателя от перегрева (с запрещением повторного включения привода до снижения температуры допустимого значения), предусмотрена блокировка от ограничивающего конечного выключателя. При

Блок автоматики и питания датчиков перерабатывает диагностические сигналы от блоков электропривода, управляет режимами работы и наладки электропривода с учетом блокировок, а также сигнализацией состояния электропривода. Блок питания системы управления содержит стабилизированные источники  $\pm 5$  В,  $\pm 15$  В,  $\pm 15$  В. Источники  $\pm 15$  В выполнены по схеме компенсационного последовательного стабилизатора постоянного тока с непрерывным регулированием. Источник  $\pm 5$  В включает в себя ШИП. Имеется защита от недопустимого превышения или занижения напряжения, а источник  $\pm 5$  В, кроме того, защищен от перегрузки по току. Электропривод выпускается в двухкоординатном исполнении, в одном шкафу размещены электроприводы механизмов подачи двух координат.

## ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДИСКРЕТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Системы управления шаговым двигателем (ШД), состоят из нескольких блоков. Функциональная схема (рис. 79) содержит формирователь и распределитель импульсов (ФИ и РИ соответственно), промежуточный усилитель (ПУ), усилитель мощности (УМ) и блок питания (БП). Рассмотрим схему применительно к четырехфазному ШД.

Сигнал управления  $f_y$  в виде импульсов напряжения поступает на вход *ФИ* от внешнего управляющего устройства. Блок *ФИ* видоизменяет входные импульсы, формируя их по длительности и амплитуде. Распределитель *РИ* преобразует последовательность выходных импульсов *ФИ* в четырехфазную систему однополярных импульсов напряжения, соответствующую числу фаз (обмоток) *ШД*. Импульсы с выхода *РИ* усиливаются в *ПУ* и *УМ*, питающие

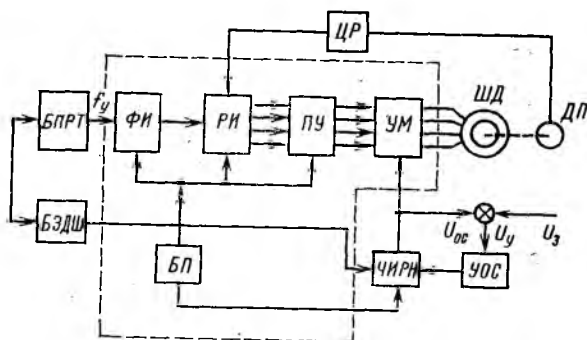


Рис. 79. Функциональная схема шагового привода

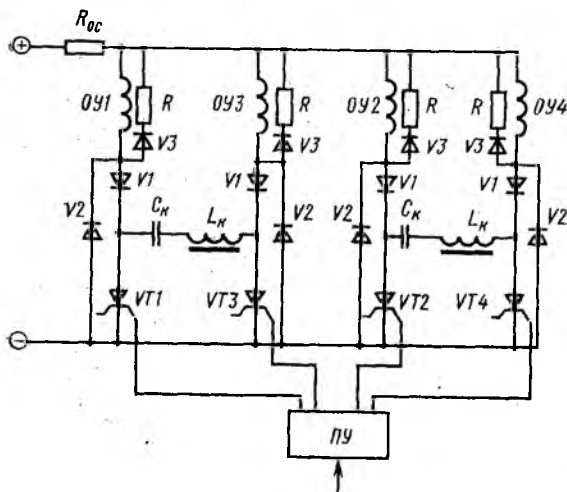


Рис. 80. Схема усилителя мощности шагового привода

обмотки ШД. Усилители мощности бывают тиристорными и транзисторными.

Рассмотрим схему (рис. 80) тиристорного усилителя, управляющего обмотками управления  $OY1...OY4$  шагового двигателя. Основная часть схемы образована тиристорами  $VT1...VT4$ , обеспечивающими парную коммутацию обмоток ШД, при которой в каждый момент времени включены две фазы (обмотки) из четырех. Тиристоры  $VT1...VT4$  образуют схемы, в которых переключение тириستоров производится с помощью колебательных контуров  $L_k-C_k$  и диодов  $V1$  и  $V2$ . Принцип действия схемы поясним на примере работы триггера на тиристорах  $VT1...VT3$ .

Допустим, что в исходном положении тиристор  $VT1$  открыт и по обмотке  $OY1$  проходит ток, а тиристор  $VT3$  закрыт. Конденсатор  $C_k$  при этом заряжается.

Если подать импульс управления на  $VT3$ , он откроется и по обмотке  $OY3$  начнет проходить ток. Одновременно по цепи  $L_k-VT3-V2-V1$  начнется быстрый перезаряд конденсатора  $C_k$ , в процессе которого потенциал катода  $VT1$  становится более положительным, чем потенциал его анода, ток через него будет уменьшаться, и тиристор  $VT1$  закроется. К концу перезаряда конденсатора плюсовой станет его левая обкладка и триггер готов к новому переключению, которое произойдет при снятии импульса управления с  $VT3$  и его подаче вновь на  $VT1$ . Таким образом тиристоры в схеме триггера работают попеременно.

Аналогично работает триггер на тиристорах  $VT2$  и  $VT4$ . Для обеспечения вращения ШД в одном направлении тиристоры переключают в последовательности  $VT1-VT2$ ,  $VT2-VT3$ ,  $VT3-VT4$ ,  $VT4-VT1$ ,  $VT1-VT2$ , а для противоположного направления вра-

шения — в последовательности  $VT1-VT2$ ,  $VT2-VT1$ ,  $VT1-VT4$ ,  $VT4-VT3$ ,  $VT3-VT2$ ,  $VT2-VT1$  и т. д.

Для снятия перенапряжений с обмоток ШД в период их коммутации параллельно этим обмоткам включены цепочки из последовательно включенных резистора  $R$  и диода  $V3$ . Рассмотренная схема управления ШД не всегда обеспечивает высокие динамические свойства, точность обработки входных сигналов и энергетические показатели шагового привода, поэтому современные схемы управления ШД содержат дополнительные блоки (см. рис. 79), с помощью которых характеристики шагового привода улучшаются. В качестве блоков служат ШИР напряжения (ЧИРН), усилитель обратной связи по току (УОС), блок электронного дробления шага (БЭДШ), блок плавного разгона и торможения (БПРТ), датчик положения и скорости (ДП) вала ШД и цифровой регулятор (ЦР).

Блок ЧИРН совместно с УОС служит для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания момента ШД, благодаря чему улучшаются энергетические показатели его работы. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току, сигнал которой  $U_{oc}$  снимается с резистора  $R_{oc}$  (см. рис. 80), находящегося в общей шине питания ОУ шагового двигателя. Разность сигналов  $U_{oc}$  и задающего  $U_z$  образует сигнал управления, который поступает на вход УОС (см. рис. 79) и после усиления изменяет среднее значение напряжения питания усилителя мощности и тока в обмотке ОУ регулированием частоты переключения ЧИРН.

Для улучшения качества движения ШД при низких частотах и повышения точности обработки входных командных импульсов с помощью БЭДШ уменьшается шаг двигателя. Расширение динамических свойств шагового привода, связанное, в частности, с увеличением рабочего диапазона частот, значительно превышающих частоту приемистости, происходит благодаря введению в схему блока БПРТ, обеспечивающего разгон и торможение ШД с заданным (близким к предельному) темпом, при котором еще не происходит пропуска входной информации. Практика показала, что наличие блока БПРТ в 2—3 раза расширяет область рабочих частот привода.

Серийно выпускается система управления БУШ-1 с шаговым шестифазным двигателем типа ШД5Д1М. Расстояние между двигателем и системой управления не должно превышать 1,5 м. Блок рассчитан на питание однофазным напряжением 220 В и встраивается в шкаф электрооборудования, поставляемый комплектно с двигателем.

#### Технические характеристики БУШ-1:

Номинальное напряжение питания, В . . . . .	220
Номинальный выходной ток фазы двигателя, А . . . . .	3
Допустимая разница между значениями токов одновременно включенных фаз двигателя, А . . . . .	0,1
Напряжение форсирующего импульса, В, не более . . . . .	120

Длительность форсирующего импульса напряжения, мкс, не более . . . . .	500
Амплитуда форсирующего импульса тока, А, не более . . . . .	6
Частота приемистости, Гц, не менее . . . . .	2000
Максимальная частота коммутации, Гц . . . . .	7500
Максимальная потребляемая мощность, Вт, не более . . . . .	350

Структурная схема БУШ-1 приведена на рис. 81. Она содержит блок питания (БП), шесть плат управления фазами ШД и шесть силовых выходных цепей, панель коммутатора. На вход панели коммутатора от внешнего управляющего устройства подаются сигналы управления приводом, сигналы «Вперед», «Назад». БП предназначен для питания цепей управления, силовых цепей и цепей коммутатора выпрямленным напряжением. Выпрямители собраны по двухимпульсной схеме со средней точкой. Каждая из шести плат управления состоит из усилителя мощности (УМН), силового ключа (СКН), ждущего мультивибратора (ЖМ), усилителя мощности (УМВ) и силового ключа (СКВ).

Усилитель мощности УМН служит для согласования входного сопротивления платы с соответствующим выходом коммутатора и усиления по мощности сигнала управления силовым ключом низкого напряжения (СКН). Последний служит для непосредственного питания фаз двигателя. Ждущий мультивибратор служит для формирования импульсов форсировки, которыми управляется силовой ключ высокого напряжения (СКВ). Усилитель мощности УМВ служит для формирования импульса форсировки, поступающего со ждущего мультивибратора и управляющего силовым ключом высокого напряжения.

Он служит для питания фаз двигателя высоким напряжением.

Принцип действия состоит в коммутации фаз двигателя ключами СКН и СКВ в необходимой последовательности. Сигналы управления поступают на коммутатор блока, а затем поступают на усилитель мощности УМН. С выхода УМН усиленный сигнал передним фронтом запускает ждущий мультивибратор ЖМ и одновременно поступает на силовой ключ СКВ. При одновременном включении силовых ключей СКВ и СКН ток в фазе шагового двигателя форсированно нарастает в течение времени выдержки ждущего мультивибратора

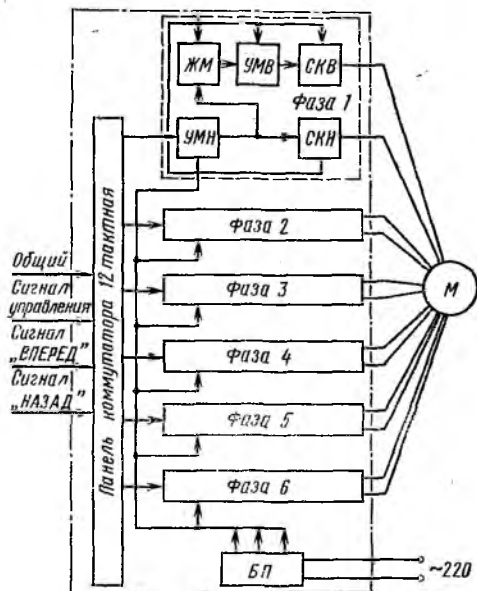


Рис. 81. Структурная схема шагового привода серии БУШ-1



**ЖМ.** При этом питание фазы двигателя осуществляется от источника высокого напряжения. По истечении времени выдержки мультивибратора *ЖМ* (300 мкс) ключ *СКВ* закрывается и номинальное значение токов в фазе двигателя удерживается за счет источника низкого напряжения.

В режиме неподвижного состояния двигателя под током питание фаз двигателя осуществляется от *СКН*. Реверс двигателя осуществляется подачей на входы «Вперед» или «Назад» логических сигналов 0 или 1 и 1 и 0.

### ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

У такого двигателя коллектор имеется, но он является бесконтактным благодаря применению фотоэлектронного коммутатора. Двигатель содержит трехфазную статорную обмотку и якорь с постоянными магнитами.

Рассмотрим принцип действия бесконтактного коллектора. На валу двигателя *М* имеется фотоэлектронный датчик с диском, имеющим например, четыре сектора (рис. 82), сдвинутых на 90° друг относительно друга (число секторов зависит от числа пар полюсов статорных обмоток двигателя). Диск вращается в щели фотоголовки, содержащей три светодиода *ИС* и три фотодиода *А, В, С*. При пересечении диском световых лучей на выходе фотодатчика формируются три потока импульсов. После соответствующих преобразований импульсы подаются на управляющие электроды тиристоров коммутатора *ТК* в такой последовательности, которая обеспечивает вращение ротора двигателя *М* в нужном направлении. Частота вращения двигателя определяется величиной напряжения переменного тока, а формирование формы напряжения производится системой фотоимпульсный датчик — тиристорный коммутатор.

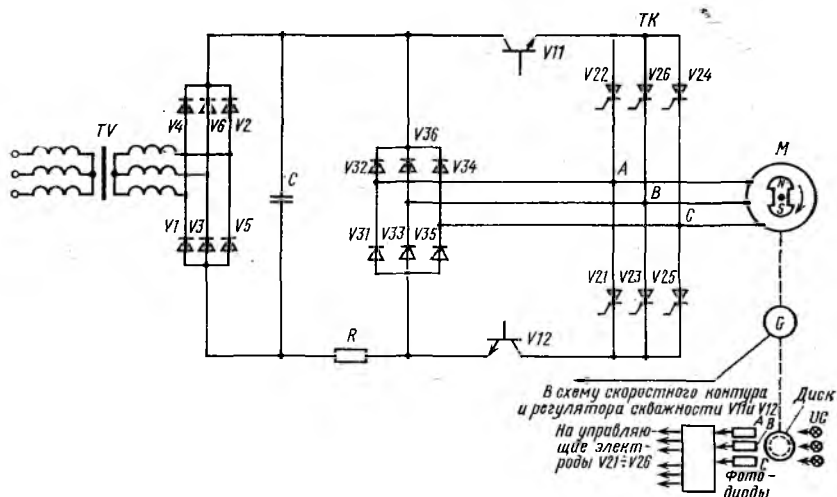


Рис. 82. Силовая схема вентильного электропривода

На том же рисунке приведена схема силовой части преобразователя, питающего статорные обмотки двигателя. Она состоит из силового трансформатора  $TV$ , на вторичной обмотке которого включен трехфазный мостовой выпрямитель, собранный на вентилях  $V1 \dots V6$ . На выходе выпрямителя имеется фильтр, состоящий из батареи конденсаторов  $C$ . Выпрямленное напряжение коммутируется с частотой 2—3 кГц силовыми транзисторными ключами  $V11$  и  $V12$  и попадает на тиристорный коммутатор  $TK$ , состоящий из шести тириستоров  $V21 \dots V26$ . Статорные обмотки двигателя подключены к точкам  $A, B, C, K$  этим же точкам присоединен обратный мост (диоды  $V31 \dots V36$ ), предназначенный для обеспечения обмена энергией между двигателем и конденсатором  $C$ .

Работа схемы происходит следующим образом: выпрямленное напряжение, снимаемое с трехфазного моста  $V1 \dots V6$ , коммутируется транзисторными ключами  $V11$  и  $V12$  с частотой 2—3 кГц и переменной скважностью для изменения амплитуды напряжения, подаваемого на тиристорный коммутатор  $TK$ . На выходе  $TK$  благодаря фотоимпульсному датчику формируется напряжение переменного тока, обеспечивающее вращение двигателя в требуемом направлении. Тахогенератор является датчиком обратной связи по скорости в системе регулятора скорости, который управляет скважностью выпрямленного напряжения.

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### МОНТАЖ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Привод поставляется комплектно, поэтому в документации указывают заводские номера двигателя, преобразователя и других элементов привода. Перед монтажом следует убедиться, что заводские номера узлов привода совпадают с указанными в паспорте. При выборе места для установки блока преобразователя следует учесть условия отвода выделяющейся в нем теплоты. Если блок размещается в электрошкафу или ниже станка, то размеры их и условия теплообмена с окружающей средой должны быть выбраны так, чтобы температура воздуха внутри шкафа не превышала 45°C для приводов обычного исполнения и 50°C для приводов тропического исполнения. Если в преобразователе силовые элементы имеют ребра охлаждения, то его располагают так, чтобы было обеспечено свободное обтекание воздухом конструкции охладителя.

При установке блока на малом расстоянии от другого электрооборудования следует предусматривать возможность доступа к отдельным элементам блока без его отключения, в особенности к переменным регулировочным резисторам. Преобразователи, монтируемые после транспортировки и длительного хранения, должны быть тщательно просушены. Для монтажа в преобразовательном

**7. МОНТАЖНЫЕ ИНДЕКСЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Тип привода	Якорь	Возбуждение	Тахогенератор	Задатчик	Сеть	Дроссель	Коррекция
ЭТ1Е1	5, 6	7, 8	—	5, 10, 11	1, 2	3—5	C4, R16
ЭТ1Т1	5, 6	7, 8	5, 9	5, 10, 11	1, 2	3—5	C4, R16
ЭТ3И	«0» вторичной обмотки, Я1	4, 5	14, 128	14, 131	—	49 59	C27, R45
ЭТ6	01, 52	10, 11	0, 90	0, 91, 128	А, В, С		C306, R308, R309
ЭТУ3601	8, 13	9, 10 (А7, 7)	22, 23	18, 21, 15	А1, В1, С1	8, Я1	
ЭШИР	35, 36	34, 37	8, 30, 2	59, 60 1, 30	А, В, С	36, 5	—
ЭТА	Я1, 0	4, 5	14, 128	144, 146, 145, 1, 147	А, В, С А1, В1, С1	49, Я1, 59, Я1	C27, R45
ЭТ3	Д1, 2	Ш1, Ш2	4, 6, 7	А, В, С	—	—	—
ЭТРП	82, 1	Ш1, Ш2	157, 0	149, 233, +10 В	А1, В1 С1	—	—
ЭТО1	13, 16	7, 10	—	22, 24, 25	Л11, Л21	7, 13	C6, R26
ЭТО2	15, 16	9, 11	—	22, 24, 25	Л11, Л22	7, 13	C19, R35 C24
ПТЗ	Я2, Д1	Ш1, Ш4	10, 20	216, 20 217	А, В, С	—	C607, C608, C610, C611
ПТЗР	Я2, Д2	Ш1, Ш4	10, 20	216, 20, 217	А, В, С	51, Я2, 52, Я2	R409, R411, R420, R422
ПКВТ	Я2, Д2	Ш1, Ш2	42, 43	45, 43, 21	а, в, с	Я2, 2	R211, C102, C207
ПМУ	1, 2	1, 3	—	13, 25, 14	Л12, Л22, Л32	—	—
ПМУ-М	1, 2	1, 3	—	13, 25, 14	Л12, Л22, Л32	—	—
ПМУ-П	1, 2	1, 3	1, 4	44, 40, 46, 52	Л12, Л22, Л32	—	—
ПМС-М	—	8, 9	3, 4	5, 6, 7	1, 2	—	—
ПМУ-М	Д1, Д2 (1, 13)	Ш1, Ш2 (25)	—	21, 20, 23	Л13, Л23, Л33	—	—
ПТР-04 М	11, 12	103, 104	1, 2	2, 3, 131	3—1, 3—2 3—3	—	R101, C30
ЭТШР	Я2, Д1	Ш1, Ш2	251, 42	251, 231, 243, 2	А1, В1, С1	Др2, 29	C13, R19
ПТОР	Я2, 10/4	14, 15	8, 9	5—7	3, 4	Ш10/1, Я2	C7, 30

блоке предусмотрен разъем для внешних соединений. В прилагаемой к комплекту привода документации приведены монтажные схемы приводов, показывающие, к каким клеммам присоединяются двигатель, обмотка возбуждения, напряжение, задатчик скорости, тахогенератор, дроссели и др.

В табл. 7 приведены числовые индексы для внешних соединений наиболее распространенных серий электроприводов постоянного тока. Монтажная схема шагового привода серии БУШ-1 приведена на рис. 83. В основном преобразователи имеют открытое исполнение, предназначенное для встройки в электрошкаф станка. Перед установкой и монтажом привода необходимо провести внешний осмотр, обратив особое внимание на надежность электрических соединений. Монтаж для включения привода и соединения его с двигателем производят проводами сечением 1—6 мм<sup>2</sup>, в зависимости от номинального тока двигателя. Провода цепей управления могут иметь сечение 0,5—0,75 мм<sup>2</sup>.

**Способы защиты приводов от помех.** Различают следующие источники возникновения помех: наводки от внешних электромагнитных полей; паразитные связи по цепям питания и заземления; искажение формы сигнала в линиях связи.

В общем случае помеха — это посторонний сигнал, вносящий искажения в работу или вызывающий ложное срабатывание выходного устройства. Полезные сигналы и помехи могут восприниматься в виде суммарного сигнала. Источником помех являются электросварка, короткие замыкания, кратковременные перегрузки сети, коммутация электрических аппаратов и т. д.

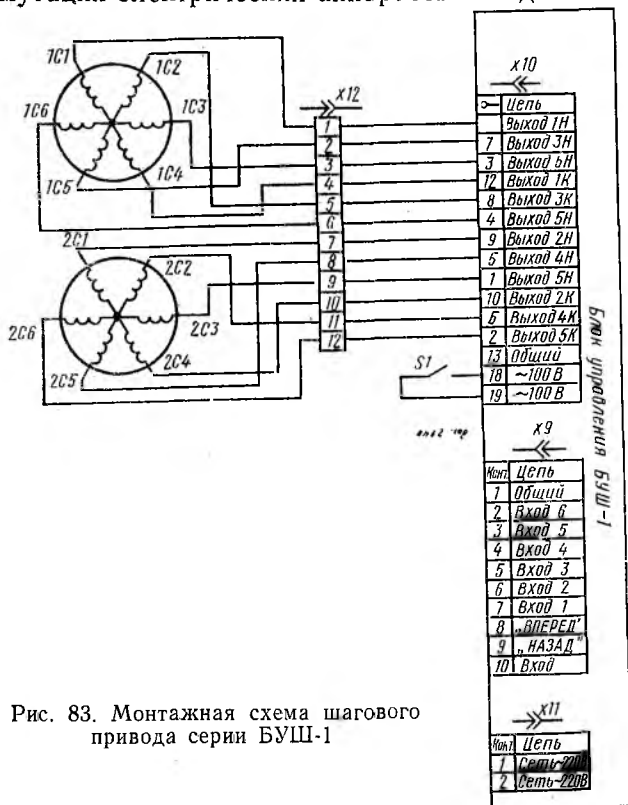


Рис. 83. Монтажная схема шагового привода серии БУШ-1

Наиболее эффективным методом борьбы с помехами является раздельная прокладка электрических цепей различного назначения. В электроприводе целесообразно разделять силовые цепи от цепей управления. Цепи управления — это цепи, имеющие энергетический уровень до 2 Вт, а силовые — более 100 Вт.

Скрутка проводов также способствует увеличению помехозащищенности. Промышленностью выпускаются кабели с парной, четверочной, двойной парной и др. видами скрутки. Уменьшение шага скрутки в 10 раз дает уменьшение амплитуды электромагнитных помех в 5 раз (обычно рекомендуется 25—30 витков на метр длины провода).

Для защиты электропривода от воздействия внешних электромагнитных полей служит экранировка. Наибольшее применение получили экранированные провода. Основным правилом экранировки является ее электрическая непрерывность, т. е. если экранированный провод проходит через разъем, необходимо обеспечить надежное электрическое соединение всех участков экрана. Заземление экранированных проводов должно производиться только в одной точке. Она должна находиться возможно ближе к источнику помех.

Следует остановиться на способах правильного подключения тахогенератора, фотоимпульсного датчика положения, устройств ЧПУ и цифровой индикации. Монтаж их обязательно производится экранированным кабелем с витыми парами, скрученными с шагом 10—20 мм и помещенными в экран. Экраны проводов должны быть изолированы от корпуса станка, труб, металлорукатов, электрически соединены между собой и контактом соответствующего разъема. В случае наличия реле, двигателей и электромагнитных муфт работающих совместно, надо принять меры к повышению помехозащищенности электронных устройств. Если аппараты работают на постоянном токе, целесообразно зашунтировать их катушки обратными диодами.

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Выпускаемые комплекты приводов являются надежными изделиями и при правильной эксплуатации способны работать длительное время без ремонта. Что же означает правильная эксплуатация? Это, в первую очередь, отсутствие недопустимых длительных перегрузок, недопустимого числа частоты включений, перегрева двигателя, дросселей и преобразователя. Необходимо также обеспечить периодическую очистку составных частей привода от пыли и грязи. При эксплуатации для обеспечения нормальной работы привода необходимо периодически проводить профилактический осмотр.

В зависимости от объема и сроков проведения осмотры разделяют на первый, второй и освидетельствование. Первый осмотр проводится один раз в месяц, второй — не реже одного раза в три месяца. Освидетельствование производится после выработки га-

рантийного ресурса, после аварии и при поломках. Содержание первого осмотра: удалить пыль и грязь, масло и посторонние предметы; очистить коллектор двигателя от пыли; продуть электродвигатель и блок преобразователя сухим сжатым воздухом. Содержание второго осмотра: выполнить то же что и при первом осмотре, а потом проверить надежность крепления элементов привода, арматуры и щеткодержателей двигателя, крепление его траверсы по заводской метке, состояние рабочей поверхности коллектора и износ щеток, состояние релейно-контактной аппаратуры, надежность заземления, сопротивление изоляции относительно корпуса. При освидетельствовании выполнить все требования первого и второго осмотров, произвести смазывание двигателя, зафиксировать винты разъема.

При эксплуатации необходимо следить за чистотой электродвигателя и помещения, а также за тем, чтобы на двигателе и внутри него не было посторонних предметов. Особо тщательно нужно следить за чистотой коллектора и исправностью щеточного аппарата.

**Эксплуатация коллектора.** Поверхность нормально работающего коллектора должна быть полированной и иметь красноватый цвет с фиолетовым оттенком. Правильно отполированная поверхность увеличивает срок работы коллектора и способствует хорошей коммутации машины. При загрязнении коллектор следует протереть чистой мягкой неволокнистой сухой тряпкой, слегка смоченной в бензине.

Если на поверхности коллектора имеются значительные следы обгорания, чистку следует проводить наждачной бумагой, нагнутой на деревянную колодку, хорошо пригнанную по окружности коллектора. Ширина бумаги должна равняться длине коллектора. Шлифование коллектора без колодки недопустимо, его можно производить при средней частоте вращения двигателя без нагрузки. После шлифования тщательно протереть коллектор тряпкой, смоченной в бензине.

Если в результате износа коллектора поверхность меди сравнялась с изоляцией, коллектор следует продорожить на глубину 1—1,5 мм, после чего коллектор следует шлифовать. Если путем шлифования коллектор невозможно привести в нормальное состояние, то его необходимо обточить, затем отшлифовать. Обточка коллектора производится на токарном станке резцом. Коллектор при обточке не должен иметь осевых перемещений.

Для предотвращения попадания внутрь двигателя стружки и медной пыли обмотку якоря следует оклеить бумагой, а по окончании шлифования продуть якорь сжатым воздухом. Необходимо иметь в виду, что обточка понижает механическую прочность коллектора, поэтому к ней следует прибегать лишь в случае крайней необходимости.

При шлифовании коллектора без разборки двигателя необходимо принять соответствующие меры по обеспечению безопасности работы.

**Эксплуатация щеток.** При осмотре проверить износ щеток. Износившиеся до предельного размера щетки необходимо заменить запасными. Вновь установленные щетки должны быть притерты к коллектору до полного их прилегания. Притирка щеток производится наждачной бумагой, которая закладывается между коллектором и щеткой (шероховатой стороной к щетке). При этом бумагу необходимо прижать к коллектору и притирать до тех пор, пока поверхность щетки не совпадет с окружностью коллектора.

В конце притирки у нереверсивных двигателей шкурку необходимо протягивать только в сторону вращения. При притирке новых щеток необходимо поднять вверх щетки, не подлежащие замене, чтобы не испортить их поверхности. При опускании щеток на поверхность коллектора необходимо следить за тем, чтобы щетка заняла свое прежнее положение. Рекомендуется в течение 8—10 ч давать  $1/3$  или  $1/4$  номинальной нагрузки, чтобы щетки приработались. Щетки должны свободно передвигаться вдоль обоймы и в то же время не должны иметь зазор более допустимого. При изношенной щетке можно допустить зазор по ширине не более 0,15 мм (по оси коллектора).

Периодически следует проверять давление щеток на коллектор. Сильное давление ведет к чрезмерному нагреванию коллектора и быстрому износу его и щеток. Слабое давление щеток вызывает искрение. Зазор между нижней кромкой обоймы щеткодержателя и поверхностью коллектора у двигателей серии П составляет 1,5—2,5 мм. При замене щеток необходимо следить за тем, чтобы жгут щетки не препятствовал ее свободному перемещению в обойме.

**Эксплуатация подшипников.** При работе двигателя температура подшипников не должна превышать 60°C. Шум в подшипниках должен быть равномерным. При нормальной работе подшипников смену смазочного материала и осмотр следует проводить после 3000 ч работы, но не реже одного раза в 3 года. При выявлении превышения допустимой температуры, неравномерного или повышенного шума подшипник необходимо осмотреть. При обнаружении трещин, сколов, шероховатости шариков или других внешних повреждений подшипник необходимо заменить новым. Если после чистки и смазывания подшипников шум или перегрев не исчезнут, подшипник также необходимо заменить. При замене неисправный подшипник следует снимать только при помощи съемника.

Для посадки на вал нового подшипника предварительно следует подогреть его в масляной ванне до 80—90°C. При подогреве подшипник следует подвесить так, чтобы он не касался стенок и дна ванны. После подогрева подшипник должен легко насаживаться на вал посредством легких ударов, передаваемых на подшипник через медное кольцо и трубу, надетую на вал.

Чрезмерное количество смазочного материала может вызвать перегрев подшипника, поэтому полость подшипника должна быть заполнена смазочным материалом не больше, чем на  $2/3$  объема. Пространство между шариками и сепараторами в подшипнике

заполняется смазкой по всей окружности, а углубления в наружной и внутренней крышках заполняют смазочным материалом от 1/3 до 2/3 объема углублений. Количество смазочного материала необходимого для наполнения каждого подшипника, у отдельных типов машин находится в пределах от 40 до 80 г.

После сборки двигателя рекомендуется в течение 2—3 мин вращать его вал вручную (для первоначального распределения смазки), потом включить двигатель на холостом ходу на 5 мин при пониженном напряжении. Для проверки качества сборки подшипниковых узлов нужно включить двигатель на холостом ходу в течение 5—10 мин при нормальной частоте вращения. Чрезмерное нагревание, повышенный или неравномерный шум покажут неудовлетворительную сборку подшипников.

Необходимо строго следить за уплотнениями в двигателях закрытого исполнения. Во время осмотров следует проверять состояние прокладок коллекторных люков и коробки выводов. Прокладки должны иметь гладкую поверхность, без трещин и уступов. Прокладки, потерявшие эластичность, должны быть заменены новыми. Затяжка болтов, крепящих крышки, должна периодически проверяться. Сальники коробки выводов разбираются только при необходимости нового монтажа.

**Подготовка электропривода к работе.** По окончании монтажа преобразователя надо проконтролировать его соответствие монтажным схемам, надежность заземления, произвести внешний осмотр, расконсервировать двигатель и убедиться в свободном вращении его вала, проверить правильность чередования фаз питающей сети. Задатчик скорости установить в положение, соответствующее минимальной скорости. При подготовке к работе реверсивных приводов необходимо отключить одну группу тиристоров.

Для контроля за работой привода применяют следующие электронизмерительные приборы: универсальный осциллограф типа С1-18 или С1-19Б, амперметры магнитоэлектрической системы на 5, 10, 50, 100 А с классом точности не ниже первого, вольтметры магнитоэлектрической системы на 150, 200, 500 В, фазоуказатель и др.

После подключения электропривода к сети могут обнаружиться неисправности. Это, в первую очередь, отсутствие вращения двигателя или вращение его с большой частотой, отсутствие возможности плавного изменения частоты вращения, ненормальное гудение дросселей и сердечника силового трансформатора, большой ток в силовой цепи преобразователя и т. д. Ниже приведены основные признаки и причины неисправности, присущие большинству типов электроприводов.

1. Неправильная работа, отсутствие управляемости частотой вращения, выход из строя элементов преобразователя. Причины: ошибки в монтаже, отсутствие требуемого напряжения сети.

2. Большая частота вращения. Причина: неправильно включены провода цепи обратной связи (тахогенератора или моста противо-



ЭДС), обрыв цепи обратной связи, отсутствие напряжения на обмотке возбуждения двигателя постоянного тока.

3. Большие токи в дросселях. Признаком является ненормальный шум, издаваемый сердечником силового трансформатора или дросселя, колебания силовых проводов. Основная причина: невыполнено условие правильного чередования фаз сетевого напряжения. В большинстве случаев для ликвидации неисправности достаточно один раз поменять местами провода, идущие к первичной обмотке силового трансформатора. Иногда приходится менять провода шесть раз в комбинациях ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA. Если фазы включены правильно, а уравнительные токи продолжают быть выше нормы, то причиной этого является выход из строя одного из тиристоров, неправильная настройка цепи коррекции, малое значение сопротивления в цепи тахогенератора.

4. Автоколебания вала двигателя. Причиной этого является неправильная настройка цепи коррекции или сильная обратная связь по частоте вращения. Для устранения последней достаточно увеличить сопротивление в цепи тахогенератора.

5. Несимметричность частоты вращения при реверсе. Причиной этого является неодинаковое значение задающего напряжения. Особенно это проявляется на минимальных частотах вращения. Причина: неодинаковое сопротивление контактов реле, дающего команду на реверс. Рекомендуется для устранения несимметричности применять герконовые реле. Неодинаковые значения задающего напряжения нужно выравнять при помощи дополнительных переменных резисторов, включенных последовательно в цепь задающего потенциометра.

6. Несимметричная кратность токоограничения при реверсе. Причиной этого является неправильная настройка узла токоограничения или неправильный подбор опорных диодов или напряжений в цепи токоограничения.

7. Затухающие колебания в переходном процессе. Причина: неправильный выбор параметров коррекции, сильная обратная связь по частоте вращения, избыточный коэффициент усиления усилителя. Устранение: увеличение емкости конденсатора в цепи коррекции, увеличение сопротивления резистора в цепи тахогенератора, охват усилителя активным сопротивлением в пределах 10—100 кОм.

8. С ростом задания частоты вращения она начинает уменьшаться. Причина: неправильная настройка узла ограничения выходного напряжения усилителя. Для устранения надо выяснить, какое напряжение необходимо для достижения на якоре номинального значения напряжения. Для этого надо отключить усилитель и на вход (СИФУ) подавать управляющий сигнал от вспомогательной батарейки напряжением от 0 до значения  $U_{\max}$ , после которого частота вращения начинает падать. Замерить это напряжение вольтметром. Включить усилитель и подобрать параметры ограничителя выходного напряжения так, чтобы оно не превышало значения  $U_{\max}$ .

9. Двигатель не вращается, через якорь протекает ток, достигающий недопустимого значения. Причина: обрыв в цепи обмотки возбуждения.

Для примера рассмотрим подготовку к работе электропривода серии ЭТЗИ. Проверить правильность выполнения электрического монтажа привода. Перед включением привода в сеть отключить предохранители  $F1$ ,  $F2$  и  $F3$ ; отключить дроссели  $L1$  и  $L2$ ; включить сеть и убедиться в правильности фаз по зажиганию сигнальной лампы на блоке питания. Если лампа не горит, необходимо поменять местами любые две фазы сети. Установить предохранители, присоединить дроссели  $L1$ ,  $L2$  и включить сеть. Если двигатель вращается с большой частотой вращения, которая не регулируется, необходимо поменять местами провода, идущие к тахогенератору.

Задатчик скорости поставить в положение минимальных оборотов и включить привод в сеть. Электродвигатель должен вращаться с минимальными оборотами. Вращая задатчик скорости, установить номинальную частоту вращения двигателя.

### РЕМОНТ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Надежность и безопасность электрооборудования и сетей может быть обеспечена нормальной эксплуатацией и правильной системой ремонта электрооборудования. Такой системой является планово-предупредительный ремонт. Он состоит из комплекса организационно-технических мероприятий, к числу которых можно отнести планирование, подготовку и организацию ремонта, контроль за качеством ремонтной документации и др. Чтобы увеличить межремонтные промежутки, необходимо регулярно проводить осмотры оборудования.

Текущий ремонт — основной профилактический вид ремонта — предусматривает замену быстроизнашивающихся деталей (щеток электрических машин, подшипников), зачистку подгоревших контактов и другие ремонтные работы, требующие частичной разборки оборудования. В ряде случаев эта разборка может быть произведена без демонтажа всего агрегата. Текущий ремонт требует останковки оборудования и отключения сетей. Число ремонтов узлов привода за год эксплуатации составляет для электродвигателя два малых ремонта и один средний, преобразователя — один малый, трансформатора и дросселей — один малый и  $1/2$  среднего. Текущий ремонт преобразователя производится на месте эксплуатации привода и состоит из отключения от сети; проверки сопротивления изоляции; наружного осмотра с устранением обнаруженных дефектов; проверки соединений заземления; составления ведомости обнаруженных дефектов; проверки работоспособности привода.

Средний ремонт преобразователя производится при выходе из строя полупроводниковых элементов, клемм на блоках зажимов, конденсаторов, трансформаторов и т. д.

## 8. ВОЗМОЖНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
<b>Электроприводы серий ПМУ, ПМУ-М и ПМУ-П</b>		
Автоколебания вала двигателя	<p>Для приводов серий ПМУ ПМУ-М: Неправильно отрегулирована обратная связь по току Замыкание на корпус цепи управления Периодическое изменение нагрузки</p> <p>Для приводов серии ПМУ-П: Обрыв цепи гибкой обратной связи</p> <p>Неправильно подобрано сопротивление R8 Большой зазор между валами электродвигателя и тахогенератора</p>	<p>Отрегулировать обратную связь по току 5R Устранить замыкание</p> <p>Исключить биеение нагрузки</p> <p>Проверить цепи: точка 2, R9, C3, R8, точка 1; устранить обрыв Увеличить сопротивление R8 Устранить зазор</p>
Недостаточная жесткость характеристик	<p>Обратная связь по току отрегулирована неправильно Неправильно подключен задающий потенциометр</p>	<p>Увеличить сопротивление 5R Проверить (и подключить правильно)</p>
Двигатель вращается с максимальной частотой	<p>Обрыв цепи возбуждения Перепутаны концы проводов на клеммах двигателя Обрыв фазы</p>	<p>Устранить обрыв Подключить в соответствии со схемой Устранить обрыв</p>
Не регулируется частота вращения	Обрыв цепи управления	То же
Электродвигатель регулируется только на низкой частоте вращения	Обрыв задающего потенциометра (точка 14)	
Минимальная частота вращения не соответствует паспортной	Неточно отрегулировано сопротивление резистора R1	Правильно подобрать сопротивление резистора R1
Максимальная частота вращения не соответствует паспортной	Неточно отрегулировано сопротивление резистора R2	Правильно подобрать сопротивление резистора R2

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
<b>Электроприводы серии ЭТО</b>		
Перегорает предохранитель ПР1 (ЭТО1) или ПР1, ПР2 (ЭТО2)	Короткое замыкание в цепи переменного тока	Проверить исправность вентиля и конденсаторов С2, С3 (ЭТО2)
Двигатель не вращается	Выход из строя транзисторов усилителя или СИФУ; обрыв во входной цепи или в цепи задатчика; неисправность предохранителей	Заменить транзистор; устранить обрыв; проверить предохранители
Задатчик установлен на $n=0$ , а двигатель вращается	Неправильно установлен $\alpha_{\max}$ ; обрыв цепи R27 (ЭТО1) или R25 (ЭТО2)	Устранить с помощью R27 (ЭТО1) или R25 (ЭТО2)
Максимальная частота вращения ниже установленной	Неправильная настройка узла токоограничения	Установить ток отсечки сопротивления R42 (ЭТО2)
Неравномерная частота вращения	Неправильно настроена коррекция; не управляется тиристор	Подобрать параметры цепи коррекции; устранить неисправность в цепи управления тиристором
Значительные пульсации тока	Обрыв корректирующей цепи R26—С6 (ЭТО1) или R35, С19, С24 (ЭТО2)	Устранить обрыв

**Электропривод серии ЭТ1Е**

При включении привода двигатель не вращается	Обрыв в цепи задатчика; обрыв в цепи УПТ	Устранить обрыв в цепи
При включении привода двигатель вращается с максимальной частотой. Частота вращения не регулируется задатчиком	Обрыв в цепи	То же
При включении привода двигатель вращается с большими колебаниями частоты вращения	Обрыв в цепи С2, R8, С4, R16, С3	

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
<b>Электропривод серии ЭТЗИ</b>		
Не горит сигнальная лампа указателя фаз	Неправильно включены фазы	Поменять местами любые две фазы
Не регулируется частота вращения	Положительная обратная связь по частоте вращения	Поменять местами провода на тахогенераторе
Двигатель вращается в одну сторону	Отключен один из дросселей	Подключить отключенный дроссель
Частота вращения двигателя вправо и влево не одинаковы	Неодинаковое значение задающего напряжения	Устранить асимметрию задающего напряжения
Автоколебания двигателя	Оборвана цепь коррекции	Проверить параметры цепи коррекции
Недостаточная жесткость механических характеристик	Мал коэффициент обратной связи по частоте вращения	Уменьшить сопротивление резистора R53
Большой уравнительный ток	Выход из строя тиристора	Заменить тиристор
Задатчиком скорости не удается установить номинальную частоту вращения	Неправильно отрегулированы развертывающие напряжения в блоке управления	Произвести регулировку резисторами R19, R29 и R39
Отсутствует минимальная частота вращения	Отсутствует минимальное задающее напряжение	Обеспечить наличие минимального задающего напряжения
Двигатель не вращается	Обрыв в цепи якоря	Устранить обрыв
Двигатель вращается в сторону, противоположную заданной	Неправильная полярность одновременно цепи возбуждения двигателя и тахогенератора	Поменять местами провода, идущие на обмотку возбуждения двигателя и тахогенератора

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
<b>Электропривод серии ЭТ6</b>		
При включении сети автомат отключается	Короткое замыкание в цепи привода	Устранить КЗ
При пуске электродвигатель отключается	Короткое замыкание на выходе тиристорного преобразователя, выход из строя тириستоров	Заменить тиристор
При команде на запуск двигатель не вращается	Обрыв в цепи задатчика скорости, якоря двигателя или питания реле К1; нет замыкания контакта реле К1 при наличии питания его катушки	Устранить обрыв; исправить контакт реле
В любом положении задатчика скорости двигатель вращается с максимальной частотой	Неправильно подключены провода тахогенератора, обрыв в цепи тахогенератора	Переменить местами провода тахогенератора; устранить обрыв
Электродвигатель вращается рывками	Не работает один или несколько тиристоров; не настроена цепь коррекции в скоростном контуре	Заменить тиристор или конденсатор в цепи коррекции
Электродвигатель работает в режиме автоколебаний	Обрыв в цепи коррекции; не настроены цепи коррекции	Устранить обрыв, подобрать параметры в цепи коррекции
Произвольное отключение двигателя с невозможностью последующего его запуска	Отсутствие стабилизированного напряжения $\pm 15$ В для питания скоростного контура или СИФУ	Исправить источник питания

**Электропривод серии БУ3609**

При отсутствии сигнала задания напряжение на входе устройства управления не равно нулю и двигатель вращается	Не выставлен нуль РС	Установить потенциометром нулевое напряжение на выходе РС
--	----------------------	---

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
При включении устройства управления перегорают плавкие вставки предохранителей	Короткое замыкание в цепи постоянного тока; пробой тиристорov силового моста или источника питания обмотки возбуждения двигателя; неверно установлен ток отсечки	Проверить исправность тиристорov; устранить КЗ; потенциометром R20 выставить требуемое значение тока
Двигатель самопроизвольно выходит в режим токовой отсечки и останавливается	Неисправность в источнике питания обмотки возбуждения; обрыв в обмотке возбуждения	Устранить неисправность
Напряжение на выходе устройства управления не достигает номинального значения, хотя величина сигнала задания номинальная	Неправильно установлен минимальный угол регулирования	Установить требуемую величину подбором резисторов R47, R55
При любой величине сигнала задания электродвигатель выходит на номинальную частоту вращения	Не соблюдена полярность подключения якоря или обмотки возбуждения двигателя, или якоря тахогенератора	Подключить, соблюдая полярность; проверить точный контакт и устранить неисправность
Вращение двигателя неравномерное	Неправильно выбраны параметры коррекции ПИ-регуляторов	Установить требуемые параметры коррекции регуляторов R12, C2, R30, C5
При переключении устройства выбора направления из одного положения в другое перегорают силовые предохранители	Неправильно установлен угол регулирования; в устройстве раздельного управления не работает задержка на переключение комплектов тиристорov	Проверить величину угла и установить потенциометром R41 угол $\alpha=165^\circ$ ; устранить неисправность
При переключении устройства выбора направления из одного положения в другое токоограничение различно	Выходное напряжение регулятора РС различно в положениях «Вперед» и «Назад»; сигнал обратной связи по току различен в положениях «Вперед» и «Назад»	Проверить установку нуля выходного напряжения РС, потенциометром R3 установить нулевое напряжение на выходе РС; установить дополнительное смещение на входе РТ резистором R23 так, чтобы токоограничение было одинаково (поставить перемычки 1—16 или 2—16)

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
<b>Электропривод серии БТУ3601</b>		
При включении блока преобразователя выключается автомат Р4	Короткое замыкание в цепи постоянного тока, пробой тиристора; не настроен регулятор тока	Проверить исправность тириستоров; устранить короткое замыкание; установить необходимые параметры коррекции
При отсутствии управляющего сигнала напряжение на выходе блока преобразователя не равно нулю	Неправильно установлен начальный угол регулирования	Установить резистором R41 платы E1 требуемый угол
При номинальном управляющем напряжении на выходе блока преобразователя напряжение не достигает номинального значения	Неправильно установлен минимальный угол регулирования	Установить требуемую величину $\alpha_{\min}$ резистором R50 платы E1
При любом управляющем напряжении двигатель идет «вразнос»	Обрыв щеточного контакта якоря тахогенератора	Проверить щеточные контакты и установить обрыв
Двигатель работает рывками	Выход из строя одного тиристора; не настроен регулятор скорости	Заменить неисправный тиристор; настроить цепь коррекции
Наличие асимметрии в форме тока якоря	Не настроена СИФУ	При углах регулирования $\alpha_{\min}$ устраняется с помощью подбора резисторов R1 в блоках ФИ2, ФИ3; при $\alpha_{\max}$ — с помощью подбора резисторов R11

**Электропривод серии ЭШИР**

Ток в цепи якоря равен нулю	Обрыв цепей датчика, якоря; отключился автомат F; напряжение сети ниже $0,8U_{\text{ном}}$ ; обрыв одной фазы сетевого напряжения; не снят сигнал запрета с провода 52; сработала электронная защита ключей	Устранить обрыв; заменить неисправные силовые транзисторы; проверить цепь 52; проверить силовые транзисторы ключей
-----------------------------	---	--



Признак неисправности	Причины	Способы устранения
Ток якоря больше допустимого	Заклинен якорь двигателя; обрыв обмотки возбуждения двигателя	Устранить неисправность кинематической цепи; проверить цепь обмотки возбуждения
Двигатель вращается с номинальной частотой вращения, независимо от уровня заданной частоты вращения	Обрыв цепи тахогенератора; неправильно включены фазы напряжения тахогенератора	Проверить цепь якоря тахогенератора; перебросить концы тахогенератора
Неравномерное вращение двигателя при малых и средних частотах вращения; ток якоря скачкообразный	Загрязнение коллектора тахогенератора или двигателя; коррекция системы не соответствует используемому двигателю	Очистить оба коллектора от угольной пыли, промыть бензином; рассчитать и заменить элементы цепи коррекции

## Электропривод БУШ-1

При включении преобразователя в сеть перегорает предохранитель	Вышел из строя диодный мост (V61 . . . V62)	Заменить диод
Двигатель пропускает импульсы управления	Вышел из строя один из транзисторов (V16, V17) на плате управления	Заменить транзистор
Двигатель не выходит на максимальную частоту	Отсутствует форсировка в одном из каналов блока управления. Вышел из строя один из транзисторов платы управления блока (V21 . . . V26)	То же
Нет напряжения $\pm 10$ В	Вышел из строя один из транзисторов (V66 . . . V71)	

## Электропривод серии ЭТА

Двигатель совершает колебания	Перепутаны провода датчика положения; обрыв одного конца датчика положения	Поменять их местами; устранить обрыв
-------------------------------	--	--------------------------------------

Признак неисправности	Причины	Способы устранения
Нет реверса	Самовозбуждение А9 или А10	Устранить самовозбуждение увеличением емкости цепи коррекции
Двигатель вращается с большой частотой вращения	Обрыв цепи тахогенератора; нет обратной связи по пути	Устранить обрыв; исправить плату ПУ
Двигатель вращается с малой частотой вращения	Отсутствие питания датчика положения или общей точки	Найти неисправность в цепи питания датчика или обрыв в цепи общей точки
Неравномерное вращение двигателя на минимальной частоте	Не отрегулирован угол $90^\circ$ между фазами датчика; триггеры Д15 не устанавливаются в исходное положение	Произвести регулировку датчика; проверить цепи «+1»
Двигатель вращается в одном направлении; реверса нет	Выход из строя Д30 или Д31 в ПУ	Заменить Д30 или Д31
Частота вращения не изменяется и не реверсируется	Неисправен узел кварцевого генератора	Устранить неисправность
Неравномерное с рывками вращение	Не настроены R54, R45, R53; обрыв на выходе ПУ	Настроить и устранить обрыв
Неравномерное вращение двигателя	Отключен С38 в блоке ПИ	Восстановить цепь конденсатора
Сбой в работе	Напряжение питания меньше 4,75 В	Отрегулировать канал питания на 5В
Двигатель в одну сторону работает плавно, в другую «дробит»	Неисправность в Д27, Д28 (ПУ)	Заменить Д27 или Д28
Вал двигателя проворачивается на некоторый угол и останавливается	Не отбалансирован R74 (ПИ)	Произвести дорегулировку R74
Вал двигателя поворачивается на угол меньше или больше $360^\circ$	Неправильно установлены фазы датчика; не закреплен диск фотодатчика	Закрепить диск
С ростом частоты вращения двигателя не уменьшается скоростная ошибка	Не работает узел компенсации ошибки на плате ПУ	Исправить узел

Капитальный ремонт — наиболее сложный и полный ремонт, требующий разборки оборудования и предусматривающий, частичную или полную смену обмоток, перешихтовку магнитопровода трансформатора, правку вала, замену поврежденных вентиляторов, ремонт коллекторов, изготовление новых катушек магнитных пускателей, перетяжку проводов и др. Оборудование после капитального ремонта должно отвечать тем же паспортным требованиям, что и новое.

В табл. 8 приведены виды возможных неисправностей и способы их устранения для различных серий электроприводов.

### НАЛАДКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Как правило, при эксплуатации наладочные работы не требуются. Но такая необходимость может возникнуть при длительном хранении; повреждениях при транспортировке; частичной раскомплектации привода или после ремонта. Частичная наладка соответствует дефекту, причина которого известна и устранение его не требует большой затраты труда. Для наладочных работ необходимо иметь секундомер, переносные электроизмерительные приборы для измерения тока, напряжения и мощности, частотомер, магазин сопротивлений, тахометр, токоизмерительные устройства, набор ручного электромонтажного инструмента с изолирующими ручками, прибор для контроля целости электрических цепей, мегомметр и осциллограф.

**Наладка электрических цепей.** Перед наладкой надо ознакомиться с документацией, изучение которой начинают с функциональных и структурных схем. Затем изучают принципиальную схему электропривода, его работу по блокам. Для облегчения понимания схемы используют диаграммы импульсов тока или напряжения. Следует ознакомиться со схемами соединений, выявить режимы работы оборудования. Проверку правильности монтажа электрических цепей можно осуществить одним из следующих способов. При визуальном методе определяют соответствие монтажа документации, внешнее состояние контактных соединений, расстояние между токоведущими частями. При проверке электрических цепей применяют известный метод «прозвонки».

Метод измерения токов и напряжений основан на том, что проверяется определенное распределение токов в цепях или напряжений на их отдельных участках. При испытании необходимо принять меры, чтобы измерительное напряжение не было подано на вторичные обмотки трансформаторов. Способ определения полярности цепи заключается в нахождении полярностей на участках цепей, связанных электрически, при подаче на них постоянного напряжения, а для магнитосвязанных цепей — при подаче импульсов.

Для определения начал или концов обмоток трехфазного двигателя две обмотки соединяют последовательно, а к третьей подводят напряжение. Если первая и вторая обмотки соединены од-

ноименными выводами, напряжение между свободными выводами будет равно нулю и лампа при подключении к этим выводам гореть не будет. Если эти обмотки соединены не одноименными выводами, напряжение между свободными выводами будет примерно в 2 раза больше напряжения, подведенного к третьей обмотке. Рекомендуются при данной проверке пользоваться источником пониженного напряжения, а в качестве индикатора напряжения использовать вольтметры.

При осмотре электронных элементов обращают внимание на состояние выводов, особенно в месте их выхода из соответствующего прибора. Для полупроводниковых приборов, особенно мощных, проверяют условия их охлаждения. При проверке состояния изоляции элементы, не рассчитанные на то испытательное напряжение, которое предполагается приложить к проверяемому электроприводу при данной схеме испытания, должны быть отсоединены или закорочены (зашунтированы выводы этих элементов). Особенно надо обращать внимание на полупроводниковые приборы и электрические конденсаторы.

Для конденсаторов характерно большое сопротивление (стрелка прибора установится около деления «бесконечность»). При проверке конденсаторов большой емкости (1 мкФ и более) прибор в первый момент может показать небольшое сопротивление, но по мере зарядки конденсатора сопротивление, показываемое прибором, будет увеличиваться и, наконец, достигнет очень большой величины. При проверке электролитических конденсаторов прибор следует включить, соблюдая полярность выводов конденсатора.

Если нет специального прибора для испытания транзисторов, то подключают один зажим омметра к базе транзистора, а другой — поочередно к эмиттеру и коллектору. Если к базе исправного *p-n-p* транзистора подключен положительный полюс омметра, при обоих измерениях сопротивление будет около 0,1—5 Ом (в зависимости от типа транзистора). При этом обратное сопротивление эмиттерного перехода обычно бывает больше, чем коллекторного. При изменении полярности оба измерения дадут сопротивление порядка нескольких единиц или десятков ом.

Подключая положительный полюс омметра к эмиттеру, а отрицательный — к коллектору, при исправном транзисторе получают сопротивление 10 мОм. При перемене полярности прибор покажет большое сопротивление. По результатам таких измерений можно установить, какой из электродов является эмиттером, а какой коллектором.

Основным условием правильной работы тиристорных выпрямителей является обеспечение строгой последовательности и расположения во времени импульсов на соответствующих управляющих электродах (фазировка). С этой целью производится **фазировка системы управления**. Рассмотрим процесс фазировки на примере трехфазной мостовой схемы выпрямления. В этой схеме одновременно работают два тиристора. Поэтому блоки управления

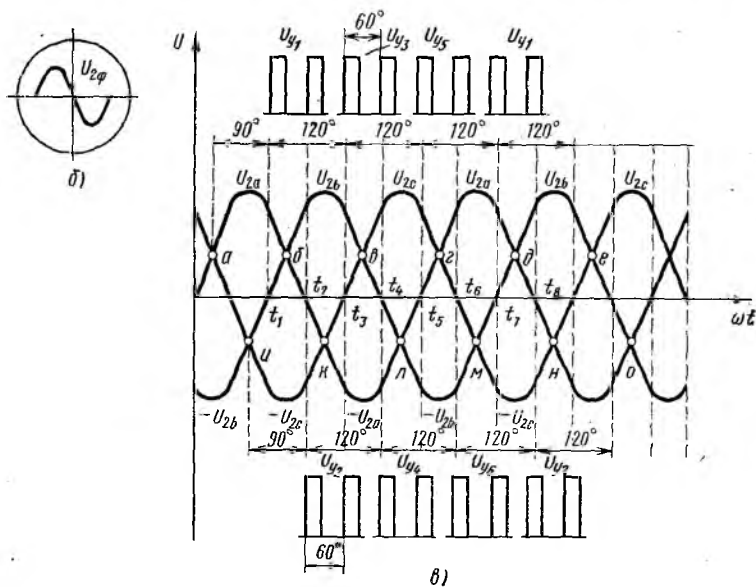
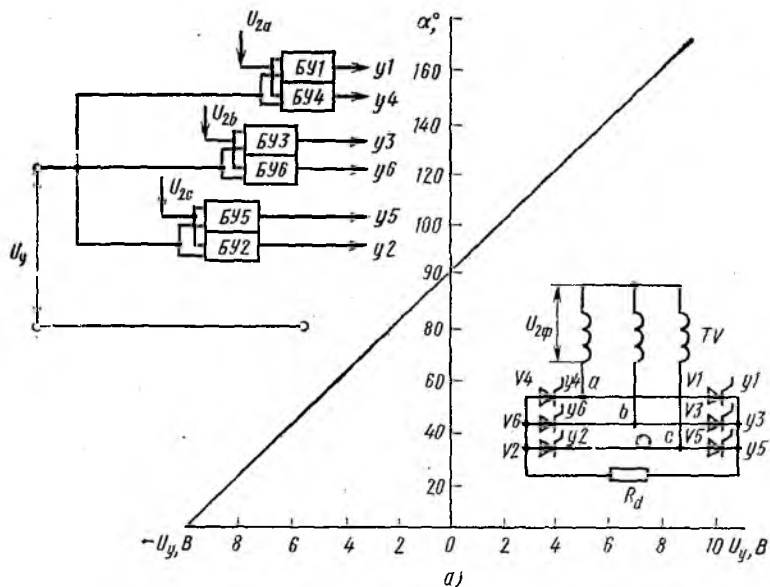


Рис. 84. Временные диаграммы чередования фаз и управляющих импульсов, полученные при помощи однолучевого осциллографа

БУ1...БУ6 соединяются по два и каждая пара питается от одной фазы вторичной обмотки силового трансформатора TV (рис. 84, а).

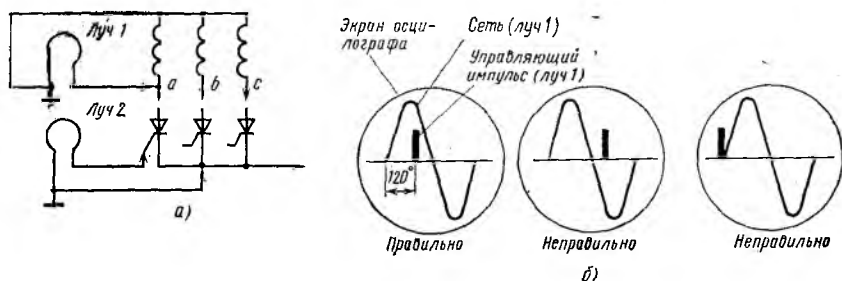


Рис. 85. Временные диаграммы чередования фаз и управляющих импульсов, полученные при помощи двухлучевого осциллографа

Фазировка производится с помощью одно- или двухлучевого электронного осциллографа. Рассмотрим фазировку при помощи однолучевого осциллографа типов ЭО-7, С1-19. Его горизонтальную развертку регулируют так, чтобы на экране была видна синусоида напряжения  $U_{2ф}$  в удобном для наблюдения масштабе (рис. 84, б). После этого надо зарисовать на миллиметровую бумагу кривые фазных напряжений, подаваемых на аноды (катоды) тиристоров  $V1-V3-V5$  ( $V4-V2-V6$ ), и отметить на оси времени (рис. 84, в) начала и концы положительных полупериодов напряжений  $U_{2a}$ ,  $U_{2b}$  и  $U_{2c}$ , последовательность фаз которых должна соответствовать чередованию  $A-B-C$ .

Далее следует отключить силовой трансформатор и включить питание системы управления (СУ). Поочередно присоединяя к выходу СУ осциллограф, необходимо убедиться в том, что каждая пара отпирающих импульсов на тиристорах катодной ( $V1-V3-V5$ ) и анодной ( $V2-V4-V6$ ) групп сдвинута между собой на  $120^\circ$  и имеет такой же порядок чередования, как и напряжения  $U_{2a}$ ,  $U_{2b}$ ,  $U_{2c}$  (пары тиристоров  $V1$  и  $V4$ ,  $V3$  и  $V2$ ,  $V5$  и  $V6$ ). Затем производят начальную установку отпирающих импульсов со сдвигом на  $90^\circ$  относительно точек  $a, б, в, \dots$  естественного открывания тиристоров. Если это не удастся сделать, надо пересоединить первичные обмотки трансформаторов формирования импульсов. Точная установка начального угла отпирания тиристоров  $\alpha = 90^\circ$  производится для каждого тиристора изменением напряжения смещения, подаваемого на базу входного транзистора  $VT1$  (см. рис. 21) при помощи резистора  $R_{см}$ . Правильная фазировка и установка угла зажигания контролируется наличием симметричности в форме тока якоря двигателя.

Если имеется двухлучевой осциллограф, то фазировка тиристоров, например, для трехфазной нулевой схемы производится следующим образом. На луч 1 (рис. 85) подается анодное напряжение, на луч 2 — управляющее. Расположение управляющего импульса на втором тиристоре показано на рис. 85, б.

Аналогичные операции производятся на всех шести тиристорах. Если управляющий импульс расположен неправильно, меняют места фазы сетевого напряжения (на высокой стороне

силового трансформатора) до получения требуемого расположения импульсов. При фазировке тиристорных преобразователей необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Это связано с наличием как у однолучевых, так и у двухлучевых осциллографов общей точки «Земля», которая соединена с корпусом прибора. Для изоляции цепей силовой части от цепей управления надо применять разделительный трансформатор. При этом на осциллограф подается сигнал с его вторичной обмотки. Необходимо также обратить внимание на соблюдение прямого чередования фаз сетевого напряжения, подаваемого на преобразователь. Для этого можно применить фазоуказатель или при помощи осциллографа добиться правильного включения фаз сетевого напряжения.

**Порядок наладки приводов серий ПМУ и ПМУ-М.** 1. Собрать привод по схеме. Включить амперметр в цепь якоря и подключить вольтметр к якорю и к обмотке возбуждения двигателя. Проверить монтаж с помощью омметра. В дальнейшем перед каждым пуском во избежание повреждения амперметра шунтировать его на время разгона двигателя.

2. Ручку задатчика повернуть влево до упора. Движок задатчика должен оказаться в точке 13 схемы (см. рис. 32). На привод желательно подать 50—60% номинального сетевого напряжения. Нагрузить двигатель так, чтобы ток якоря составил 20—30% номинального (для данного типа привода). Двигатель должен начать вращаться, вольтметр возбуждения должен показывать напряжение 40—60% номинального, вольтметр якоря — от нескольких вольт до нескольких десятков вольт. Поворачивая ручку задатчика вправо, следует убедиться в том, что напряжение на якоре и скорость вращения двигателя растут, а напряжение возбуждения не изменяется.

3. Подать на привод полное сетевое напряжение. Постепенно увеличивая ток нагрузки, проверить, не возникают ли автоколебания скорости и соответственно тока и напряжения в цепи якоря. Если автоколебания возникают, убрать их, уменьшив величину сопротивления резистора  $R5$  перемещением регулировочного хомутика. Если автоколебаний нет, но скорость сильно снижается при увеличении нагрузки, увеличить сопротивление резистора  $R5$ .

4. При номинальном напряжении сети и номинальной нагрузке установить при помощи резистора  $R3$  напряжение возбуждения двигателя равным 90% номинального. При помощи резистора  $R1$  предварительно установить нижний предел регулирования скорости, а при помощи  $R2$  — верхний.

5. В приводах серии ПМУ-М установить величину тока смещения. Для этого установить такую величину сопротивления резистора  $R4$ , чтобы при отсоединении провода, ведущего от движка задатчика к блоку питания (точка 25 схемы), частота вращения двигателя, нагруженного током 25% номинального, не превышала 15% номинальной частоты.

6. Постепенно увеличивая сопротивление резистора  $R5$ , добиться, чтобы при изменении нагрузки от 25 до 100% номинальной перепад частоты при любом положении движка задатчика не превышал величины, указанной в паспорте. Затем уточнить сопротивление резистора  $R1$ .

Изменяя напряжение питания в пределах от 85 до 105% номинального, проверить, чтобы в любом допустимом режиме по частоте вращения и нагрузке не возникало значительных незатухающих колебаний или неравномерного вращения вала двигателя. Если колебания обнаруживаются, то следует уменьшить величину  $R5$ , вновь уточнить величину  $R1$  и повторно проверить привод на отсутствие автоколебаний. После окончательной установки сопротивлений резисторов  $R5$  и  $R1$  уточнить величину  $R2$ .

**Порядок наладки приводов серии ПМУ-П. 1.** Проворачивая от руки вал двигателя в заданном направлении вращения, определить с помощью вольтметра полярность на зажимах тахогенератора (см. рис. 33).

2. Собрать привод по схеме. Включить амперметр в цепь якоря и подключить вольтметры к обмотке возбуждения и к якору двигателя.

3. Отвернуть винты и снять крышку коробки полупроводниковых блоков. Отключить блок промежуточного усилителя (ПУ).

4. Зашунтировать амперметр в цепи якоря, подать на блок питания сетевое напряжение. При небольшой нагрузке двигатель должен вращаться с малой скоростью или вообще не вращаться. Провести предварительную настройку смещения, для чего перемещением регулировочного хомутика на резисторе  $R7$  (индексы элементов заимствованы из заводской документации, которая в книге не приводится) добиться, чтобы при указанной выше нагрузке двигатель вращался с частотой 1—2 об/мин. Отключить привод от сети.

5. Повернуть ручку потенциометра задатчика до упора влево. Поставить на место блок промежуточного усилителя и зафиксировать замок штепсельного соединения. Подать на привод напряжение сети. Двигатель должен остаться неподвижным либо начать вращение с малой скоростью. При повороте движков задатчика вправо скорость двигателя должна увеличиться.

6. Снять шунт с амперметра (не отключая привод от сети). Увеличивая нагрузку на двигатель до полной остановки, определить ток якоря, на который настроена цепь токоограничения (ток отсечки). С помощью переменных резисторов наладить цепь на ток отсечки в пределах 2—2,2 номинального тока якоря. В дальнейшем шунтировать амперметр при пусках двигателя не требуется.

7. При помощи переменного резистора установить на обмотке возбуждения напряжение, равное 90% номинального.

8. При помощи переменных резисторов добиться, чтобы изменение частоты вращения при изменении нагрузки и напряжения сети соответствовали значениям, приведенным в паспорте.



# **9. НАЗНАЧЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИВодОВ СЕРИЙ ПМУ, ПМУ-М И ПМУ-П**

Обозначение по схеме	Серия приводов	Назначение	Результат увеличения сопротивления
<i>R1</i>	ПМУ,	Ограничение наименьшей частоты вращения	Наименьшая частота вращения увеличивается
<i>R2</i>	ПМУ-М	Ограничение наибольшей частоты вращения	Наибольшая частота вращения уменьшается
<i>R10, R11, R3</i>	ПМУ-М ПМУ-П, ПМУ, ПМУ-М, ПМУ-П	Регулирование напряжения возбуждения двигателя	Напряжение возбуждения уменьшается
<i>R4</i>	ПМУ-М	Регулирование тока смещения	Ток смещения уменьшается
<i>R7</i>	ПМУ-П	Регулирование степени обратной связи по току	Сигнал токовой связи увеличивается
<i>R5</i>	ПМУ,	Регулирование степени гибкой обратной связи	Сигнал гибкой обратной связи увеличивается
<i>R8</i>	ПМУ-П	Регулирование коэффициента усиления системы	Коэффициент усиления уменьшается
<i>R12</i>	ПМУ-П	Регулирование тока отсечки в цепи якоря	Ток отсечки уменьшается
<i>R16</i>	ПМУ-П		

9. При помощи переменных резисторов вызвать автоколебания и затем снизить их амплитуду до 5% установленной частоты вращения. Перед наладкой узла гибкой обратной связи необходимо проверить его фазировку. Для этого, установив частоту вращения равной 1% от номинальной, разорвать цепочку гибкой обратной связи. Амплитуда колебаний частоты вращения должна вырасти, а частота снизиться. Затем цепь гибкой обратной связи должна быть восстановлена.

10. После настройки цепочки гибкой обратной связи вновь провести операцию 8, а затем 9 (без проверки фазировки связи).

В табл. 9 указано назначение регулировочных резисторов приводов серий ПМУ, ПМУ-М, ПМУ-П и их влияние на наладку. Для приводов серии ПМУ-П особое внимание следует обратить на полярность подсоединения тахогенератора, так как при неправильной полярности отрицательная связь по скорости становится положительной и после пуска двигатель разгоняется до максимальной скорости вращения независимо от положения задающего потенциометра. При этом на вход полупроводникового усилителя подается высокое напряжение, а по цепи тахогенератора проходит ток больше допустимого, что может вывести из строя обмотку якоря тахогенератора.

Если на схеме не указаны точки подсоединения тахогенератора, то правильную полярность можно определить путем пробного включения. Включив в цепь якоря электродвигателя резистор величиной 10÷20 Ом, следует пустить привод на минимальную частоту вращения. Если двигатель заметно разгоняется, следует переменить полярность подключения тахогенератора.

Периодические колебания частоты вращения электродвигателя в приводах серий ПМУ и ПМУ-М свидетельствуют о том, что сопротивление резистора  $R5$  велико (положительная обратная связь по току велика). Автоколебания могут возникнуть и от других причин, например от замыкания пружины ползунка потенциометра на корпус (в приводах ПМУ, ПМУ-М), большого зазора в сочленении вала двигателя и тахогенератора в приводах ПМУ-П и т. д.

Длительная перегрузка привода может привести к перегреву блока питания (силовых обмоток магнитных усилителей, селеновых выпрямителей) и электродвигателя, что приводит к ухудшению механических и электрических свойств изоляции, возникновению короткозамкнутых витков в обмотках усилителей и якоря и выходу их из строя.

Селеновые выпрямители допускают температуру нагрева  $75^{\circ}\text{C}$ , превышение которой влечет за собой выход их из строя. Перегрузка электродвигателя приводит к перегреву и выходу из строя его коллектора. Во избежание выхода из строя электродвигателя ограничивается и частота пусков. Так, для приводов, не имеющих узла токоограничения, допустимая частота включений не должна превышать двух—трех за 1 ч; при наличии узла токоограничения — не более 100 пусков за 1 ч. Превышение указанной частоты включений приводит в конечном счете к выходу из строя электродвигателя.

Блок питания привода должен быть защищен от коротких замыканий. Следует учесть, что неодинаковое напряжение на фазах также может отрицательно повлиять на работу привода (например, несоответствие минимальной и максимальной частот вращения паспортным и т. д.). Но такие режимы не являются типовыми, так как допустимое отклонение напряжения в фазах не должно превышать 2%. После восстановления равенства напряжений на входе привод будет работать нормально.

**Наладка электропривода серии ЭТ6.** До наладки (см. рис. 41, б) необходимо установить три автоматических выключателя. Один устанавливается на первичной стороне силового трансформатора, два — на вторичной стороне. Хотя в схеме привода предусмотрена защита, исключающая включение преобразователя при неправильной фазировке, однако в виду того, что эта защита может быть не отлажена, целесообразно фазировку провести. Для этого надо распаять перемычку в т. 19 (см. рис. 41, г) и закоротить ее на 0. Это обеспечит нулевое значение напряжения на входе СИФУ. После этого подать на входы двухлучевого осциллографа импульс управления одного из тиристоров катодной группы. Не выключая автоматы, подать на второй вход анодное напряжение (точка 01 и фазы A1, B1, C1, X1, Y1, Z1) на клеммы силового трансформатора. Методом перебора отыскать такую фазу, относительно которой импульс будет отставать на 150—170 эл. градусов. Зафиксировать результат. Аналогичную проверку произвести для всех тиристоров катодной группы. Если

заводской монтаж сделан правильно, фазировку тиристоров анодной группы можно не делать.

*Проверка работоспособности системы управления.* Включить автомат. Для исключения возможности пропадания импульсов управления при работе на максимальных частотах вращения надо подать на осциллограф сигнал с точек 0, 137 (указанные индексы имеются в сопроводительной документации на электропривод). С помощью сопротивлений в цепях пилообразных напряжений R101, (R111, R121, R131, R141, R151) обеспечить равенство их амплитуд пульсирующего тока на выходе шестифазного мостового выпрямителя.

Для определения состояния усилителей регуляторов установить задатчик скорости на точки 0 и 91. Подать ступенчатый задающий сигнал напряжением 2 В и, изменив полярность сигнала, проконтролировать величину и изменение полярности сигнала на выходе регулятора скорости (точка 100) и регулятора тока (точка 19). Величина выходных сигналов должна быть не менее 12 В.

Для установки минимального угла зажигания надо соединить вход осциллографа с точками 0, 5 (выход нуль-органа). Подать задающий сигнал 2 В и с помощью резисторов R344 (R336) установить длительность узкой части двухполярного выходного сигнала прямоугольной формы на микросхеме A101 равной 1—1,5 мс. Аналогичную операцию произвести с микросхемами A121, A131, A141, A151, A161.

Для настройки датчика тока добавить в трансформатор тока второй виток и при включенном автомате установить с помощью резистора R403 напряжение в точке 120 0,25 В. Для предварительной настройки узла токоограничения установить задатчик скорости в положение  $n=0$ . С помощью резистора R354 установить в точке 135N (139N) напряжение 2 В.

*Контроль работоспособности силовой части.* Установить управляющий сигнал на СИФУ равным нулю. Отключить одну группу тиристоров (точка 51 или 50), включить импульсы управления тиристорами и, плавно меняя задающее напряжение, пройти весь диапазон частоты вращения. С помощью осциллографа контролируется форма тока якоря двигателя. Сигнал снимается с шунта. На холостом ходу ток должен иметь прерывистый характер и иметь шесть пульсаций на период. Наряду с этим оценивается уровень искрения под щетками двигателя. При номинальной частоте вращения двигателя замерить напряжение на его якоре и тахогенераторе, который имеет коэффициент передачи 30 В при 1000 об/мин. Аналогичные испытания провести с другой группой тиристоров.

Если отклонений нет, включить обе группы тиристоров. Вновь проконтролировать ток в цепи якоря. Если нужно, с помощью регулировки R101...R151 и увеличения C101...C151 до 0,1 мкФ выровнять высоту пульсаций тока в цепи якоря. Пройти весь диапазон частоты, контролируя поведение двигателя.

**Настройка регуляторов.** Убедиться в правильности присоединения проводов от тахогенератора и полярности сигнала обратной связи току. Подать сигнал от задатчика на вход СИФУ и загрузить двигатель до номинального значения тока в цепи якоря. При совпадении знака сигнала по току с выходным напряжением усилителя скоростного контура следует изменить полярность сигнала, поступающего от датчика тока.

**Расчет параметров регуляторов тока и скорости.** Расчет параметров ПИ регулятора тока  $C_{рт}$  ( $C313$ ),  $R_{рт}$  ( $R323$ ) и ПИ регулятора контура скорости производится следующим образом. Зададимся величиной коэффициента  $K$  трансформатора тока, равной 0,1, что соответствует двум виткам в датчике тока и величине  $R408=120$  кОм. Затем по формулам, указанным в паспорте электропривода, рассчитывают  $C_{рт}$  и  $R_{рт}$ . Запаять эти элементы в соответствии с расчетом.

Плавно разгоняя привод, с помощью  $R302$  устанавливается требуемая зависимость между напряжением задания и частотой вращения двигателя (например,  $U_{зад}=10$  В;  $n_{дв}=1000$  об/мин). Установив осциллограф на якорь тахогенератора (точки 0 и 90N) задать  $U_{зад}=1$  В ( $n=100$  об/мин), после чего ступенчато изменяя  $U_{зад}$ , контролировать вид переходного процесса.

**Отладка токоограничения привода.** Включив автомат, установить с помощью  $R354$  в точках 135N (139N) напряжение отсечки  $U_0$  по току при пуске, равное  $U_0=(3-4) I_{ном}$ . Включив автоматы АВ2 и АВ3 и плавно разгоняя привод с помощью  $R306$ , добиться, чтобы, начиная с  $n=300$  об/мин, начало уменьшаться напряжение  $U_{135N}$ . Задавая ступенчатые сигналы, соответствующие максимальной частоте, оценить уровень пускового тока в конце разгона и сравнить с величиной, допустимой для двигателя. Наряду с этим контролировать уровень искрения под щетками двигателя при пусках и реверсах.

**Наладка электроприводов серии БУЗ609.** После проверки наличия напряжения на обмотке возбуждения двигателя приступаем к контролю работы системы регулирования (СР). Для этого необходимо удалить плавкие вставки предохранителей  $F1$ ,  $F2$ ,  $F4$ ,  $F5$  и установить  $F3$  (см. рис. 43, б). Включить сеть. Проверить напряжение в контрольных точках. Установить задающий потенциометр в нулевое положение. Включить устройство выбора направления в положение Н и выставить потенциометром напряжение —10 В на потенциометре задания частоты вращения. Переключить выбор направления в положение В и установить на задатчике +10 В. При этом напряжение в контрольной точке 15 относительно общей точки должно быть не более  $\pm 0,1$  В. Далее производим проверку ограничения углов регулирования: максимальный угол не должен превышать  $165^\circ$ , минимальный —  $45^\circ$ . Подгонку углов производим при помощи потенциометров, предусмотренных схемой. Проверяем наличие импульсов на одном комплекте тиристоров. При этом на другом комплекте они должны отсутствовать.

Приступаем к проверке работы системы управления в замкнутой системе электропривода. Для этого установить предохранители  $F1$  и  $F2$ . Включаем сеть. Установить устройство выбора направления в положение  $B$  или  $H$ . При этом двигатель не должен вращаться. При помощи регулировочных потенциометров и изменения зазора дросселя добиться непрерывной формы тока в цепи якоря. Установить ток отсечки на уровне  $2I_n$ . Зашунтировать такое число диодов в нелинейном звене, чтобы имел место минимальный угол поворота вала двигателя. Проверить наличие реверса при  $1/3$  номинальной частоты вращения. Если колебательный процесс имеет более двух—трех колебаний, надо точнее подобрать параметры цепей коррекции. Установить номинальную частоту вращения и проверить отсутствие значительных ее колебаний во всем диапазоне регулирования. В случае их наличия устранить при помощи регулировочных резисторов  $R12$  и  $R30$ .

**Наладка электропривода серии ЭТУ 3601.** Задаваясь быстрым действием электропривода, по методике, имеющейся в сопроводительной документации, производим расчет параметров корректирующих цепей регуляторов скорости и тока. Аналогично рассчитывают и выбирают параметры подстроечных элементов узла защиты. Затем производят настройку узла зависимого токоограничения, исходя из допустимой пусковой токовой диаграммы двигателя. При этом производится расчет и установка подстроечных резисторов по методике, изложенной в техдокументации. Способы фазировки сетевого напряжения, проверки правильности присоединения выводов тахогенератора, настройки системы фазового управления и логических схем раздельного управления, ограничения выходного напряжения регуляторов принципиально ничем не отличаются от других систем тиристорных электроприводов, описываемых ниже.

**Наладка электропривода серии ЭТЗИ.** Перед наладкой и контролем узлов привода необходимо отключить один из уравнивательных реакторов. По свечению сигнальной лампочки убедиться в правильности фазировки сетевого напряжения. Напряжение на выходе усилителя проверяют по вольтметру. При изменении частоты вращения от нуля до номинальной вольтметр должен изменять свои показания от 0 до 3—4 В в обе стороны.

Балансировка усилителя регулятора скорости производится путем установки перемычки в точках  $131$ ,  $14$  (см. рис. 40, б). Поворотом ползунка  $R51$  добиваются нулевого показания на вольтметре, присоединенном к выходу усилителя. Если баланс не устанавливается, необходимо проверить наличие балансировки первого каскада усилителя. В зависимости от результатов контроля надо заменить один из ОУ.

Регулировку узла токоограничения приводят следующим образом: отключить сетевое напряжение и присоединить вольтметр к точкам  $112$ ,  $14$ . Включить сетевое напряжение и задатчиком скорости установить максимальную частоту вращения. Если показания вольтметра больше или равны выходному напряжению

усилителя, надо изменить величину  $R55$  так, чтобы напряжение было меньше выходного на 10%. Для проверки величины тока отсечки надо установить  $n=10$  об/мин и застопорить двигатель. При этом ток в цепи якоря не должен превышать 3—4  $I_n$ . Можно также применять способ отключения обмотки возбуждения двигателя. После включения сети ток якоря не должен превышать указанного значения.

Наладку блока управления тиристорами производят при вынутой плате блока усилителя. Провода вспомогательной батарейки типа Крона присоединяют к точке 14 и к контакту 22 свободного разъема блока усилителя. Включают сетевое напряжение и с помощью вспомогательного потенциометра увеличивают напряжение от 0 до 4 В. При этом частота вращения должна иметь максимальное значение. Повторяют это при вращении в противоположную сторону путем изменения полярности батарейки. Если частота вращения не максимальна, необходимо произвести подрегулировку резисторами  $R19$ ,  $R29$  и  $R39$ .

При смене типа двигателя выходное напряжение усилителя может оказаться недостаточным или избыточным. Для приведения его в соответствие надо изменить величину резисторов  $R59$  и  $R62$ . Для установки максимальной частоты предусмотрен переменный резистор  $R54$ .

**Наладка электропривода серии ЭТА** (см. рис. 47—51). После распаковки и монтажа готового привода вынуть платы  $ПУ$  и  $ПИ$ . Соединить точки 131 и 14 с напряжением вспомогательного реверсивного задатчика, питаемого от батарейки типа Крона. Отключить цепь 49. Включить привод и установить правильное чередование сетевых фаз. При правильном чередовании фаз и правильном включении тахогенератора частота вращения будет увеличиваться вместе с ростом задающего напряжения. Включить цепь 59 и проверить работу привода в обоих направлениях вращения двигателя. Проверить балансировку усилителя скоростного контура. Вставить платы  $ПУ$  и  $ПИ$  и включить сетевое напряжение. Вал двигателя должен находиться в одном положении и при приложении момента (в обе стороны) в пределах номинального тока якоря угол отклонения вала от исходного положения не должен превышать 2—3°. Подать на вход преобразователя задающие импульсы и проверить работу привода в режиме позиционирования и слежения в обе стороны вращения вала двигателя.

Из-за неточной настройки регулировочных резисторов могут встретиться нижеследующие отклонения от нормальной работы привода.

**Неустойчивая работа на больших скоростях.** Причина: неправильная установка  $R53$  в плате усилителя аналоговой части привода. Для регулировки необходимо вынуть плату и соединить ее с разъемом при помощи удлинительного жгута. Включить привод и поворотом ползунка  $R53$  добиться нормальной работы привода во всем диапазоне изменения уровня частоты вращения. В мо-

мент включения напряжения сети двигатель делает поворот на угол 20—50°. Это устраняется настройкой  $R74$  в блоке  $ПИ$ .

**Неравномерное вращение на малой частоте.** Причина: неточно установлена головка датчика положения. При помощи двухлучевого осциллографа надо настроить оба канала фотоимпульсного датчика так, чтобы сдвиг по фазе между ними составил 90 эл. градусов.

Нормальная работа привода обеспечивается правильной и точной настройкой аналоговой части привода. Это особенно важно при использовании другого типа двигателя. При этом необходимо вынуть платы  $ПИ$  и  $ПУ$  и при помощи батарейного задатчика (потенциометр  $R=10$  кОм, реверсивный тумблер и батарейка Крона) надо точно отстроить привод. Для этого надо подобрать новое значение  $R53$  и в случае необходимости изменить параметры корректирующей цепи  $R45$ ,  $C27$ . В некоторых случаях целесообразно изменить номиналы резисторов  $R59$  и  $R62$  в стороны снижения их сопротивления.

**Указания по наладке электроприводов серии ЭШИР.** Ток якоря измерить с помощью амперметра магнитоэлектрической системы. Установка токоограничения (как в двигательном, так и в тормозном режиме) корректируется величиной резисторов  $R100$  и  $R161$  в плате управления  $Я1$  (см. рис. 44). Установка верхнего предела частоты вращения (при использовании встроенного в преобразователь источника 100 В) задается резистором  $R267$ , установленным на плате  $Я3$ . С увеличением сопротивления  $R267$  верхний предел скорости уменьшается.

Установка «нулей» регуляторов производится при отключенном автоматическом выключателе (блок  $БРК$ ) и присоединенной через наладочный жгут плате  $Я1$ . Установка нулей регуляторов может производиться при входном контроле и при замене двигателя после изменения номиналов сменных резисторов, обеспечивающих коррекцию системы.

В приводах ЭШИР-1-2 установка «нулей» регуляторов, размещенных на плате  $Я1$ , производится в следующем порядке: замкнуть внешним тумблером контакты 10, 52, чем закорачивается выход регулятора частоты вращения на вход; установить «нуль» на выходе датчика тока резистором  $R160$ , контроль «нуля» производится вольтметром по выходу микросхемы  $D12$ , (контрольная точка  $КТ3$ ); установить «нуль» на выходе датчика статического тока резистором  $R75$ , контроль «нуля» производится вольтметром на выходе микросхемы  $D5$  (контрольная точка  $КТ6$ ); установить «нуль» на выходе регулятора тока резистором  $R103$ , контроль «нуля» производится вольтметром по выходу микросхемы  $D8$  (контрольная точка  $КТ9$ ); разомкнуть точки 10, 52 и подать на вход регулятора частоты вращения сигнал 300 мкВ со вспомогательного резистора 680 Ом, присоединенного к точкам 1 и 30, точки 1, 2, 8 и 30 закоротить; резистор  $R71$  установить в такое положение, при котором переход выходного напряжения из одного насыщенного состояния в другое происходит за одинаково-

вые промежутки времени. При реверсе входного сигнала 300 мкВ, контроль производится осциллографом по напряжению контрольной точки  $KT8$ ; отсоединить вспомогательный резистор 680 Ом, подключить тахогенератор к точкам 3 и 30, точку 2 и выход датчика к точкам 1 и 30.

В приводах ЭШИР-1-1 установка «нулей» регуляторов производится в следующем порядке: установить «нуль» на выходе датчика тока резистором  $R160$ , контроль «нуля» производится вольтметром по выходу микросхемы  $D12$  (контрольная точка  $KT3$ ); установить «нуль» на выходе регулятора частоты вращения резистором  $R71$ , контроль «нуля» производится вольтметром по напряжению контрольной точки  $KT8$ ; установить «нуль» на выходе регулятора тока резистором  $R103$ , контроль «нуля» производится вольтметром по выходу микросхемы  $D8$  (контрольная точка  $KT9$ ).

При изменении номиналов подстроечных элементов, связанном с изменением типа или размера двигателя, необходимо предварительно рассчитать и определить ближайший номинал подстроечных элементов по методике, изложенной ниже, а затем производить замену.

Исходными данными в расчетах являются:  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение двигателя, В;  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток якоря, А;  $n_{\text{ном}}$  — номинальная частота вращения, об/мин;  $J$  — суммарный момент инерции двигателя и механизма, Н·м<sup>2</sup>;  $r_{\text{я}}$  — сопротивление якоря двигателя, Ом;  $U_{\text{тг}}$  — напряжение тахогенератора при номинальной частоте вращения, В.

Дополнительные данные, определяемые расчетным путем: коэффициент передачи двигателя, 1/В·с

$$K \cong n_{\text{ном}}/10 (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}}),$$

коэффициент передачи тахогенератора, В·с

$$K_{\text{тг}} \cong 10 U_{\text{тг}}/n_{\text{ном}},$$

электромеханическая постоянная, с

$$T_{\text{м}} \cong 0,11 J R_{\text{я}} n_{\text{ном}}^2 / (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}})^2,$$

электромагнитная постоянная

$$T_{\text{я}} \cong \frac{1}{R_{\text{я}}} \left( \frac{1,9 U_{\text{ном}}}{p n_{\text{ном}} I_{\text{ном}}} + 2,5 \cdot 10^{-3} \right),$$

где  $p$  — число пар полюсов двигателя.

Для приводов ЭШИР-1-2 определяют:

сопротивление в цепи обратной связи по частоте вращения

$$R65 = 200 U_{\text{тг}};$$

сопротивление в цепи обратной связи регулятора тока

$$R101 = 165 \cdot 10^3 \frac{T_{\text{м}} T_{\text{я}} n_{\text{ном}}}{K};$$



сопротивление связи между датчиком тока и регулятором тока

$$R153 = \frac{1,75}{(1,43 \cdot 10^3 T_{я} - 1) \cdot R_{я}} R101;$$

сопротивление обратной связи инерционного звена

$$R84 = 10^6 T_{м};$$

входное сопротивление инерционного звена

$$R77 = \frac{R84 \cdot 10,5 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{R153} + \frac{R_{я} \cdot 0,57}{R101}};$$

сопротивление связи инерционного звена и сумматора

$$R87 = \frac{T_{м} \left( \frac{0,1 \cdot 10^3}{R153 \cdot R_{я}} + \frac{57}{R101} \right) 10^6}{K_{д} K_{тг}};$$

сопротивление дифференцирующего звена

$$R78 = R84.$$

Для приводов ЭШИР-1-1 определяют:

сопротивление в цепи обратной связи по частоте вращения

$$R65 = 200 U_{тг};$$

сопротивление обратной связи регулятора тока считается постоянным и равным  $R101 = 30$  кОм;

сопротивление связи между датчиком тока и регулятором тока

$$R153 = \frac{52,5 \cdot 10^3}{(10^3 T_{я} - 1) R_{я}};$$

сопротивление обратной связи регулятора частоты вращения

$$R290 = 2,5 \cdot 10^8 \frac{I_{ном}}{R153};$$

элементы RC-цепи обратной связи регулятора частоты вращения

$$R69 = \frac{19 \cdot 10^3 T_{я} T_{м} n_{ном}}{K};$$

$$C15 = \frac{22 \cdot 10^3}{R69}.$$

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### МОНТАЖ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Преобразователь ПЧ-3,5-3200 имеет кроме исполнения в виде отдельного шкафа еще встраиваемое исполнение. При встраивании преобразователя в шкаф необходимо выполнять следующие

рекомендации. Для обеспечения достаточной вентиляции снизу и сверху кассеты должны оставаться свободные промежутки не менее 40 мм, особенно это важно учитывать при размещении трансформатора и других элементов, выделяющих большое количество теплоты. Кассету необходимо заземлить. Затем в соответствии со схемой соединить кассету проводом с сечением  $1 \text{ мм}^2$  с трансформатором, реактором, сетевыми и выходными (нагрузочными) разъемами или клеммниками. Проводом с сечением не менее  $0,5 \text{ мм}^2$  и длиной не более 5 м соединить кассету с кнопками управления, переключателем частот электрошпинделей, переключателем и потенциометром, задающими частоту электрошпинделя, и лампами индикации. Эти провода следует размещать в индивидуальном металлоукаве не ближе 200 мм от силовых проводов преобразователя и проводов электрооборудования механизма.

Шкафы преобразователей размещают на полу около станков. Площадка для установки должна быть ровной. Шкафы преобразователей желательно размещать над кабельной канавой. Это позволяет упростить подсоединение кабелей. При отсутствии кабельной канавы желательно установить шкаф на высоте 5—10 см от пола на специальных опорах. Площадка для установки шкафа ЭКТ должна иметь закладные конструкции, на которые указанный шкаф монтируется опорными швеллерами. После размещения следует выполнить внешний осмотр, чтобы не было механических повреждений. Необходимо выявить поврежденные элементы и проверить качество паяк.

Затем измеряется сопротивление изоляции между соединенными сетевыми выводами преобразователя и корпусом шкафа, между контрольными точками силовых блоков и корпусом, между контрольными точками блоков управления и корпусом, между радиаторами охлаждения вентиля и корпусом (рекомендуется для ЭКТ), для преобразователей ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200 рекомендуется также — между сетевыми выводами и контрольными точками. При этом силовые полупроводниковые приборы необходимо закоротить, блоки управления вынуть, отсоединить преобразователь от сети и нагрузки, отключить выводы конденсатора фильтра радиопомех от корпуса преобразователя, закоротить между собой контрольные точки силовых блоков, затем контрольные точки блоков управления. Сопротивление изоляции в холодном состоянии между контрольными точками силовых блоков и корпусом, измеренное мегаомметром на 1000 В, должно составлять не менее 5 МОм. Сопротивление изоляции токоведущих частей двигателя должно быть не менее 1 МОм. Сопротивление изоляции между контрольными точками блоков управления и корпусом, измеренное мегаомметром на 100 В, тоже должно быть не менее 5 МОм. Отсчет показаний производится по истечении 1 мин после подачи измерительного напряжения.

Кроме общих требований техники электробезопасности [13] необходимо подчеркнуть следующие указания по мерам предосторо-

рожности при пуске, эксплуатации, ремонте и наладке электроприводов переменного тока. Измерения следует производить, стоя на изоляционном коврике, не касаясь металлических оболочек приборов. Вынимать и вставлять блоки разрешается при обесточенном преобразователе. При эксплуатационных и ремонтных работах необходимо убедиться, что напряжение на конденсаторах отсутствует. Во время работы преобразователя шкаф преобразователя необходимо держать закрытым. Шкаф преобразователя должен быть надежно заземлен.

Измерение и испытание электроприводов производится следующими приборами. Мегаомметром — измерение сопротивления изоляции; комплектом К50 (или аналогичный) — измерение напряжений, токов и мощности, потребляемых двигателем от преобразователя и преобразователем из сети; осциллографом — проверка импульсов системы управления, формы напряжения на силовых элементах преобразователя и на нагрузке; частотомером — определение частоты инвертора; тахометром — измерение частоты вращения двигателя; секундомер — измерение времени разгона и торможения двигателя; ампервольт-омметром — проверка сопротивлений элементов; вольтметром — измерение напряжений постоянного и переменного тока. Затем производится подсоединение преобразователя к сети и к электрооборудованию механизма. Автомат преобразователя должен быть отключен. В табл. 10 приведены числовые индексы разъема внешних соединений.

**10. МОНТАЖНЫЕ ИНДЕКСЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Тип привода	Сеть	Двигатель	Дистанционное управление					Контакт в схеме станка
			Задатчик частоты вращения	Общий провод задания	Аналоговое задание	Кнопка «Пуск»	Кнопка «Стоп»	
ТПЧ-40	A, B, C	—	—	—	—	—	—	—
ПМС-М	A, B, C	A, B, C	5, 6, 7	—	—	—	—	—
ПЧ-3,5-3200	3, 7, 12	6, 11, 15	2	5,9	4	8	14	13, 16
ПЧ-4-200	—	—	—	c2, c7	a7	—	—	a6, c1
ЭКТ	A1, B1, C1	A2, B2, C2	14(1,7)	1	7	8,9	11, 12	3, 4
Размер 2М-5-2	A, B, C	C1, C2, C3	—	ОВ	VX, VZ, УЧПУ	—	—	КПВ1, КПВ2

Большинством преобразователей можно управлять от местного или дистанционного пульта. Для этого необходимо провести определенные переключения. При первом пуске электропривода у потребителя, а также при использовании его со станками без систем ЧПУ применяют в основном местное управление. В станках

с ЧПУ и других автоматизированных механизмах управление электроприводом производится дистанционно.

В преобразователе ТПЧ-40 имеется тумблер, переключающий управление с местного на дистанционное. При этом управление переходит на кнопки «Пуск», «Стоп» и тумблер разрешения, установленные на пульте механизма. Задание частоты может осуществляться от потенциометра на пульте механизма или от управляющего сигнала постоянного тока напряжением от 0 до 24 В.

В преобразователях ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200 имеется возможность дистанционного управления от резистивного датчика или аналогового сигнала 1,5—10 В. Провода дистанционного управляющего сигнала подсоединяются к контактам выходного разъема 4 и 9 (ПЧ-3,5-3200), а7 и с2 (ПЧ-4-200). Между контактами 5 и 9 (ПЧ-3,5-3200); с2 и с7 (ПЧ-4-200) устанавливается перемычка. Эту перемычку необходимо устанавливать только в разъеме, подключаемом к преобразователю; если эту перемычку монтировать в шкафу станка, то возможны ложные срабатывания от помех. Имеются станки, например для сверления печатных плат, с многодвигательным приводом главного движения. Если один преобразователь ПЧ-3,5-3200 не обеспечивает по мощности питание электрошпинделей станка, то к станку устанавливают два преобразователя. Если в этом случае два преобразователя управляются от одного задающего аналогового сигнала, то сигналы на отдельные преобразователи надо «развязать» диодами. Если на пульте механизма используются кнопки «Пуск» и «Торм.», то снимается только одна перемычка в шкафу (между кнопками «Пуск» и «Стоп»). Если на выносном пульте применяются кнопки «Пуск», «Торм.», «Стоп», то в шкафу необходимо снять две перемычки между этими кнопками.

Электроприводы ЭКТ предназначены для работы на одно- и многодвигательный привод. В металлообрабатывающих станках применяется, как правило, однодвигательный привод. При этом следует поставить переключатели: блока БСУ в положение «Авт.», переключатель S3 «Корр.» блока БР в—нижнюю позицию «Вкл.», тумблер S2 «Время» блока БР в—верхнюю позицию «Откл.». Для местного управления переключатель S1 «Дист.» блока БР ставится в верхнюю позицию «Откл.». В случае дистанционного управления переключатель S1 ставится в нижнюю позицию. Возможно несколько вариантов управляющего сигнала.

Первый случай: напряжение от 0 до  $\pm 24$  В. В этом случае провода дистанционного управляющего сигнала подсоединяются к клеммам 1 и 2, между клеммами 2 и 7 подключается перемычка. Знак управляющего сигнала определяет направление вращения двигателя.

Второй случай: токовый сигнал от 0 до 5 мА. Провода дистанционного управления подсоединяются так же к клеммам 1 и 2, но в этом варианте, кроме того, к ним подключается резистор

2 кОм (2 Вт) и устанавливается перемычка между клеммами 2 и 7.

Третий случай: неререверсивный сигнал от потенциометра с сопротивлением 1—2 кОм, крайние выводы потенциометра подсоединяются к клеммам 1 и 14, а средний — к клемме 7.

Четвертый случай: импульсные сигналы внешнего задающего генератора. Переключатель ячейки А8 блока БР ставится в положение с замыканием контактов 3 и 5, 4 и 6. Провода управления также подсоединяются к клеммам 1 и 2, но перемычка устанавливается между клеммами 2 и 10. Кнопки «Вкл.» и «Откл.», установленные на пульте механизма, подключаются соответственно к клеммам 8, 9 и 11, 12 электропривода. Замыкающий и размыкающий контакты реле защиты электропривода выведены соответственно на клеммы 3, 4 и 5, 6. Они могут быть использованы для команд включения и отключения электропривода в схеме электроавтоматики механизма.

После указанных работ необходимо проконтролировать внешний монтаж электропривода, убедиться в свободном вращении вала электродвигателя. Следует тщательно проверить фазировку. Так, у преобразователей ТПЧ-40 при правильной фазировке подключения сетевых проводов поток воздуха вентилятора направлен снизу вверх. При правильном чередовании фаз на входе преобразователя ПТЧКШ ярко горит лампочка на его шкафу (после подачи напряжения). Ошибочная фазировка подсоединения к сети преобразователей ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200 сигнализируется миганием лампы «Работа».

Рассмотрим порядок работы и контроль преобразователей (электроприводов) при первом включении их у потребителя. Начнем с преобразователя ТПЧ. При подаче напряжения на преобразователь загорается сигнальная лампа. Включаются автоматы двигателя вентилятора и системы управления, начинают гореть соответствующие лампы. Тумблер, разрешающий включение преобразователя, должен находиться в исходном правом положении, а резистивный задатчик — в крайнем (против часовой стрелки) положении, соответствующем минимальной частоте. Затем последовательно включается кнопка «Пуск» и переключается упомянутый выше тумблер. Начинается плавный разгон двигателя до частоты вращения, обусловленной положением частоты вращения задатчика. Перед отключением двигателя задатчик переводится в минимальное положение. После подтормаживания двигателя до минимальной частоты вращения вновь переключается тумблер и нажимается кнопка «Стоп». Если затем предстоит большой перерыв в работе преобразователя, то напряжение с преобразователя снимается в обратном порядке относительно включения.

Опробование преобразователя ПТЧКШ производится с электрошпинделем на частоты вращения 12—24 000 об/мин. Задатчик частоты вращения переводится в крайнее против часовой стрелки положение. Если станок позволяет пустить электрошпиндель, то следует включить автоматический выключатель шкафа

преобразователя и нажать на кнопку «Пуск». После окончания пуска электрошпинделя на частоту 12 000 об/мин установить задатчик частоты вращения в крайнее (по часовой стрелке) положение. Двигатель должен разогнаться до частоты вращения 24 000 об/мин, после чего отключить его кнопкой «Стоп». Через 10—15 с можно произвести повторно пробный пуск на номинальную частоту. Аналогично после смены электрошпинделей (при выключенном автомате преобразователя) следует проверить работоспособность преобразователя на диапазонах 24—96 000 об/мин.

Перед пробным пуском преобразователей ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200 необходимо перевести переключатель номинальных частот в позицию, определяемую параметрами подсоединенного двигателя. Задатчик частоты установить в положение, соответствующее минимальному значению. Преобразователь можно включать только при подключенном двигателе или статическом эквиваленте двигателя. Запрещается включение преобразователя на холостом ходу или на активную нагрузку.

Затем подается напряжение на преобразователь и включаются вводной выключатель и автоматический выключатель, расположенный в блоке питания; после этого загорается лампа «Сеть». После нажатия кнопки «Пуск» («Вперед» или «Назад» для ПЧ-4-200) начинает гореть лампа «Работа» и разгоняется двигатель. Затем производится отключение двигателя кнопкой «Стоп». При повторном пуске на номинальную частоту проверяют время разгона и торможения (после нажатия кнопки «Торм.»). В заключение проверяют работу преобразователя на максимальной частоте.

Электроприводы ЭКТ поставляют со стандартной настройкой, обеспечивающей выходные параметры согласно техническим условиям. Однако допускается подрегулировка некоторых параметров применительно к конкретному производственному механизму. Время разгона и торможения после недостаточной подрегулировки переменных резисторов  $R_1$  ( $t_{\text{разг}}$ ) и  $R_2$  ( $t_{\text{торм}}$ ) увеличивается подсоединением дополнительной емкости. Для этого переключатель  $S_2$ , находящийся, как  $R_1$  и  $R_2$ , на панели блока БР, устанавливается в нижнюю позицию. Еще большее повышение времени разгона и торможения достигается подсоединением перемычки на контакты 42 и 43 ячейки ЯОЗИ того же блока. Для увеличения перегрузочной способности двигателя по моменту можно регулировать сопротивление резистора  $R_2$  ячейки ЯОС блока защиты. Уменьшение отклонения частоты вращения при увеличении нагрузки достигается изменением сопротивления  $R_4$  той же ячейки.

При первом включении электропривода у потребителя следует провести проверку правильности его работы. Положения переключателей блока БР должны соответствовать указанным выше. К преобразователю следует подсоединить двигатель. После включения автоматов собственных нужд, подзаряда загораются

соответствующие лампы и при нажатии кнопки «Вкл.» должен включиться силовой автомат—загорается лампа «Напряжение главных цепей». Напряжение на выходе преобразователя должно равняться нулю. Следует проверить отключение силового автомата посредством кнопки «Откл.». Затем проводят пуск двигателя. Для этого нажимают кнопку «Вкл.», ключ управления переводят в позицию «Вперед», задатчик доводят до положения, при котором прибор «Выходная частота» показывает 2—3 В. Двигатель должен запуститься до небольшой скорости. Дальнейшая проверка проводится следующим образом. Задатчиком выбирается требуемая частота вращения двигателя. Для отключения привода нажимается кнопка «Откл.» и затем выключаются автоматы подзаряда и собственных нужд. После перевода ключа управления в исходное положение двигатель должен плавно замедлиться. Если при этом не будет увеличения напряжения или всплеска тока, то можно повторно запускать и тормозить двигатель в двух режимах с повышением заданной частоты вращения. Если электропривод будет работать правильно, то можно включать торможение с номинальной частоты.

Остановимся на некоторых общих вопросах пробных пусков преобразователей (электроприводов). Необходимо проверить направление вращения двигателя и, если требуется, то изменить подключение линейных проводов двигателя к преобразователю. Следует проверить выходные параметры: частоту вращения двигателя (частоту—если двигатель высокочастотный) и напряжение (желательно). На шкафу электропривода ЭКТ имеются для этого амперметр и вольтметр, показания которого пропорциональны выходной частоте. В преобразователе ТПЧ установлены вольтметр переменного тока и амперметр постоянного тока. Частота вращения двигателей низкочастотных электроприводов измеряется тахометрами. Общий состав необходимых измерительных приборов был рассмотрен ранее. Приводы ПЧ-4-200 и ЭКТ следует проверить при работе в обоих направлениях.

После наладочных операций порядок управляющих команд тот же, что и при пробном пуске. К рабочему режиму механизма можно переходить после выхода двигателя на установленную частоту вращения. Для ПЧ-3,5-3200 необходимо произвести установку переключателей при смене электрошпинделя. При срабатывании защиты следует повторить пуск двигателя. Если опять сработает защита, то надо уменьшить нагрузку или выявить неисправность, что будет рассмотрено ниже.

Проверка технического состояния преобразователей и электроприводов включает в себя измерение выходных параметров и проверку правильности функционирования. Проверка правильности функционирования может включать в себя контроль срабатывания защит и действия органов управления, измерение напряжений блоков питания, контроль наличия импульсов управления на силовых полупроводниковых приборах, пробные разгоны, торможение и работу в двигательном режиме, контроль уставок то-

коограничения и сигнализации о токовой перегрузке. Специфическим требованием при эксплуатации электропривода Размер 2М-5-2 является контроль состояния узла фазовращателя.

**Эксплуатация преобразователей частоты.** В техническое обслуживание преобразователей и электроприводов входят контрольно-профилактические работы, которые проводятся не реже одного раза в 3—12 мес. Эти работы содержат осмотр и проверку крепления разъемов, органов управления и настройки, плавности их действия и четкости фиксации, состояния лакокрасочных покрытий, монтажа, паяк, контактных соединений переключателей, разъемов, а также профилактику: удаление пыли продувкой сжатым воздухом, промывку контактов разъемов, зачистку контактов релейно-контакторной аппаратуры. Особенно надо следить, чтобы отсутствовали пыль и грязь на радиаторах охлаждения.

Если обнаружатся поврежденные элементы, то они заменяются при текущем ремонте. После текущего ремонта производится проверка и настройка блоков, которые подвергались ремонту. В профилактические работы может включаться проверка времени пуска и других выходных параметров. Если отклонения параметров превышают допустимые, то требуется настройка. Для преобразователей ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200 время пуска рекомендуется проверять при профилактике на номинальной частоте, а после ремонта, кроме того, на минимальной и максимальной частотах. Через 4000 ч работы, но не реже одного раза в 2 года дополнительно к указанному выше проверяются состояние гальванических покрытий, отсутствие сколов и трещин. Измеряют электрическое сопротивление изоляции по методике, описанной выше.

## РЕМОНТ И НАЛАДКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Наладка выпрямителей и их систем управления, входящих в преобразователи частоты, проводится по той же методике, как и в случае электроприводов постоянного тока. При наладке инверторов должны применяться высокочастотные осциллографы. Для проверки фазировки импульсов управления требуются двухлучевые осциллографы. При рассмотрении кривой тока необходимо пользоваться шунтом с малой индуктивностью. Работу инвертора требуется проверять не только в номинальном режиме, но и на холостом ходу и при максимально допустимой перегрузке. Чтобы правильно оценить выходное линейное напряжение инверторов, надо знать, что оно зависит от угла проводимости силовых полупроводниковых приборов, а при угле (интервале) проводимости 120 эл. градусов — и от коэффициента мощности нагрузки. Так, на рис. 62 показано линейное выходное напряжение (прямоугольно-ступенчатой формы) инвертора с интервалом проводимости 120 эл. градусов и активной нагрузкой. Если коэффициент мощности нагрузки менее 0,53 (двигатель на холостом ходу или мало нагружен), то указанное напряжение имеет прямоугольную



симметричную форму с длительностью каждого положительного или отрицательного импульса 120 эл.градусов. При коэффициенте мощности более 0,53 выходное линейное напряжение преобразователя имеет сложную («промежуточную» прямоугольно-ступенчатую форму. Рассмотренные выше преобразователи типов ТПЧ и ПТЧКШ имеют интервал проводимости тиристорных инверторов 120 эл.градусов. В случае интервала проводимости силовых транзисторов (ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200) и силовых тиристорных (ЭКТ) 180 эл.градусов выходное линейное напряжение всегда имеет описанную выше прямоугольную форму. Если форма выходного напряжения преобразователя отличается от указанной выше, то это может быть из-за невключения одного из тиристорных или транзисторных инверторов либо разрыва в силовой цепи.

При ремонте силовых тиристорных блоков следует обратить внимание на подробную классификацию тиристора, который ставится вместо вышедшего из строя. Кроме номинальных величин тока и напряжения в классификацию входят цифры, обозначающие подгруппы по величинам допустимой скорости нарастания напряжения и времени выключения.

Система управления инвертором налаживается с подачи на нее напряжения питания без силового напряжения. На осциллографе проверяется соответствие длительности импульсов, подаваемых на инвертор, требуемой по паспорту. Если она отличается, то необходимо проконтролировать функционирование распределителя либо формирователей импульсов. Необходимо обследовать на двухлучевом осциллографе взаимное расположение импульсов, поступающих на инвертор. Следует убедиться в наличии достаточной паузы между импульсами, идущими на силовые приборы одного плеча инвертора.

В системах управления и регулирования современных преобразователей частоты и электроприводов широко применяются интегральные микросхемы. Для ремонта и наладки указанных систем кроме осциллографов и тестеров используются специализированные приборы. Среди них следующие. Из класса анализаторов логических состояний — логический компаратор мод. 805 позволяет определять неисправные микросхемы путем сравнения контрольной и проверяемой микросхем. Испытатель цифровых микросхем типа ИЦИС служит для проверки годности в рабочем состоянии микросхем положительной логики. Правильность выполнения логических функций цифровых микросхем положительной и отрицательной логики определяется испытателем мод. Л2-41. Испытание цифровых микросхем положительной логики, установленных на плате, осуществляется комплектом испытательных тестеров типа КИТ-2.

После капитального ремонта преобразователь частоты следует включить в работу на холостом ходу или с эквивалентной активно-индуктивной нагрузкой (ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200). Затем, если все нормально, пускают преобразователь с двигателем

на холостом ходу или при сочленении с механизмом, но без его нагрузки. В этом режиме проверяют отсутствие перегрева элементов электропривода. Окончательный контроль работы электропривода проводится при номинальной нагрузке двигателя.

После ремонта иногда необходимо подобрать соотношение величин напряжения и частоты. При этом номинальной частоте должно соответствовать номинальное напряжение. Для правильной настройки контура поддержания ЭДС следует выполнить такие операции: измерить коэффициент трансформации трансформатора напряжения и активное сопротивление статора электродвигателя, рассчитать падение напряжения, равное произведению величин активного сопротивления статора на номинальный ток двигателя, разделить это произведение на коэффициент трансформации. Затем при номинальном токе с помощью переменного резистора, установленного параллельно вторичной обмотке трансформатора тока, добиться, чтобы напряжение, снимаемое с отвода резистора, было равно вычисленному выше.

**Способы устранения возможных неисправностей преобразователей частоты серии ТПЧ** (см. табл. 11). Если при работе преобразователя выходное напряжение внезапно падает до нуля, то это может произойти в результате срыва инвертирования. Срыв инвертирования — это одновременное включение двух тиристоров одного плеча инвертора, которое приводит к короткому замыканию звена постоянного тока и срабатыванию устройства токоограничения. Срыв инвертирования может произойти по одной из нижеследующих причин. Вышел из строя один из вентиля инвертора или обратного моста. Эту неисправность можно определить замером сопротивления вентиля на контрольных точках, выведенных на лицевые панели силовых блоков, с помощью тестера. Исправный управляемый вентиль должен в одном направлении иметь сопротивление, превышающее сотни килоом, а в другом направлении — сопротивление не превышающее сотен Ом. Тиристор имеет при измерении в обоих направлениях сотни килоом. Однако в схеме преобразователя тиристор через небольшие сопротивления шунтируется обратным вентилям. Таким образом, при измерении не отсоединенного из схемы тиристора тестер в одном направлении покажет прямое сопротивление вентиля. Поэтому для полной проверки тиристора испытываемый блок необходимо вынуть из ячейки, чтобы разъединить разъем. В случае обнаружения неисправного вентиля его необходимо заменить новым. Установка полупроводниковых приборов должна обеспечить хороший контакт в местах подсоединения. Затяжка силовых вентилях должна осуществляться с достаточным крутящим моментом.

Если вышел из строя коммутирующий конденсатор, то, убедившись, что на конденсаторах отсутствует остаточный заряд, следует произвести проверку их исправности тестером. При необходимости производится замена неисправного конденсатора. При выходе из строя одной из защитных RC-цепей может произойти включение тиристоров инвертора от силового напряжения без

импульса управления и срыв инвертирования. Для обнаружения неисправности необходимо поочередно вынуть из ячеек силовые блоки. В каждом блоке следует проверить монтаж  $RC$ -цепей и исправность его элементов. При обнаружении неисправности следует произвести замену новым элементом, имеющим те же номинальные данные, что и вышедший из строя элемент. При работе преобразователя на низких частотах возможен срыв инвертирования в случае какой-либо неисправности в блоке подзаряда конденсаторов. При коротких замыканиях и значительных перегрузках выходят из строя предохранители на входе схемы, расположенные на передней панели блока. Перегорание предохранителей сигнализируется лампами, расположенными там же. Замену следует производить только калиброванными предохранителями.

Контроль работы узла токоограничения (блок БУ) осуществляется с помощью амперметра, установленного в звене постоянного тока. Обрыв цепи смещения СУВ может привести к полному открытию выпрямителя и, как следствие этого, к перегоранию предохранителей ПНБ-5. В этом случае необходимо проверить исправность цепи смещения и наличие отрицательного смещения. Неисправность в силовой схеме может возникать в результате значительных колебаний в системе инвертор—двигатель. Устранение указанных колебаний достигается регулированием резистора  $R2$  блока управления.

Темп пуска двигателя от преобразователя ТПЧ регулируется переменным резистором  $R8$  (плата У5 блока управления БУ). Уровень сигнализации перегрузки по току настраивается резистором  $R4$  (плата У1), а уровень срабатывания токовой защиты —  $R3$  (плата У2) того же блока. Установка нуля, влияющая на соотношение выходных величин напряжения и частоты, производится резистором с соответствующим названием на блоке управления.

**Устранение неисправностей преобразователей ПЧ-3,5-3200 и ПЧ-4-200** (см. табл. 11). Расширенная проверка правильности функционирования преобразователей может включать в себя контроль устройств защиты. Для проверки защиты от обрыва фазы питающей сети выворачивается один из предохранителей. Если устройство исправно, то после нажатия кнопки «Пуск» начинает мигать лампа «Работа», которая продолжает мигать и после воздействия на кнопку «Стоп». Защита от неправильного чередования фаз питающей сети контролируется посредством временного пересоединения силовых проводов на входе преобразователя. Так же как в предыдущем случае, должна мигать лампа «Работа». Короткое замыкание в нагрузке имитируется подсоединением перемычек на выходных клеммах преобразователя. В данном случае после нажатия кнопки «Стоп» лампа «Работа» должна перестать гореть.

**Основные проверки электропривода ЭКТ.** После ремонта проверка электропривода ЭКТ проводится следующим образом.

Оставляется в шкафу только блок питания (БП) и отсоединяется управляющий кабель силового автоматического выключателя. При измерении на контрольных клеммах напряжения не должны отклоняться от показанных на принципиальной схеме более чем на  $\pm 20\%$ . Напряжение на блок подается автоматом собственных нужд. Следующую проверку производят при вставленных дополнительно блоках БСУ и БВУ. Осциллографом проверяют управляющие импульсы на тиристорах. На каждый тиристор должны подаваться два импульса, сдвинутые между собой на 60 эл. градусов. Продолжительность импульсов в пределах 0,4—0,7 мс, а амплитуда 7—25 В. Поставив переключатель БСУ в позицию «Ручн.» и регулируя переменный резистор  $R1$  этого же блока, следует убедиться, что сдвиг фазы импульсов при этом порядка  $150 \pm 10$  эл. градусов.

Затем вставляют все остальные блоки. Подсоединяется перемычка в гнезда А2 и Б2 разъема управления силовым автоматом. Переключатели  $S1$  и  $S3$  блока БР ставятся в верхнюю позицию. После нажатия кнопки «Вкл.» и установки ключа управления в позицию «Вперед» доводят задатчик «Вперед» до положения, при котором прибор «Выходная частота» показывает 10—12 В. На контрольных точках мнемосхем посредством осциллографа контролируются импульсы на тиристорах. Продолжительность импульсов должна составлять: на основных тиристорах 180 эл. градусов, на коммутирующих — 250—350 мкс, на подзарядных 100—180 мкс. При этом напряжению 10 В (электропривод на 380 В) или 12 В (электропривод на 220 В) по прибору «Выходная частота» должна соответствовать частота импульсов приблизительно 50 или 200 Гц соответственно. После проверки отключают электропривод, снимают перемычку, вставляют разъем управления силовым автоматом, на блоке БСУ переменный резистор  $R1$  перемещают в крайнюю правую позицию.

Следующая проверка проводится так же в положении «Ручн.» переключателя блока БСУ. После включения автоматов собственных нужд и подзаряда, нажатия кнопки «Вкл.», переключения ключа управления в позицию «Вперед» соответствующим задатчиком устанавливают напряжение на уровне 10 В по прибору «Выходная частота». На осциллографе смотрят за напряжением на коммутирующих конденсаторах. Амплитуда напряжения должна быть порядка 500—600 В (электропривод 380 В) или 300—400 В (электропривод 220 В). Отключают сначала автомат подзаряда и через 3—5 с автомат собственных нужд. Затем возвращают в исходное положение ключ управления и задающий резистор, переключатель блока БСУ переводят в позицию «Авт.»

**Основные неисправности электропривода Размер 2М-5-2 и способы их устранения.** Если произошел останов электропривода и перестал гореть светодиод с символом «Двигатель» платы индикации электрошкафа, следует выключить и вновь включить напряжение сети посредством внешнего автоматического выключателя. В случае загорания светодиодов «Стрела», на 2—3 с —

# **11. ПРИЗНАКИ, ПРИЧИНЫ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СЕРИЙНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Неисправность	Причина	Способ устранения
<b>Размер 2М-5-2 [11]</b>		
При подаче напряжения 380 В на блок ТС1 отключается внешний выключатель питающей сети	Замыкание в блоке ТС1 или в соединительных жгутах	Найти замыкание и устранить его
При подаче напряжения 380 В на блок ТС1 не включается электропривод; не горят светодиоды	Сгорел предохранитель узла вентилятора. Отключился выключатель S1 шкафа из-за перегрузки по цепям 380 В	Заменить предохранитель.  Проверить блоки ВС4 Б31, ПМ8, БК36, секцию конденсаторов блока ТС1, соединительные жгуты шкафа
Горит светодиод «Стрела», остальные не горят	Механизм подачи одной из координат станка находится в зоне действия аварийного конечного выключателя	Устранить сбой УЧПУ
Горят светодиоды «Стрела» и «Перегрев»	Один из электродвигателей перегрет выше 120°C; неисправность блока АПЗ	Установить причину перегрева и устранить ее
Горят светодиоды «Стрела» и «Вопрос»	Неисправность одного из блоков шкафа	Установить причину по состоянию световой индикации на блоках
Механизм не перемещается при подаче сигнала задания на вход	Неисправность блока РС2	Найти неисправность и устранить ее
Неравномерное перемещение вала двигателя	Обрыв в цепи фазовращателя, силовой цепи одного из блоков КСЗ, ПМ8 или силовой цепи одной из фаз электродвигателя	Найти и устранить обрыв
Недостаточная жесткость механической характеристики электропривода	Неисправность блока РС2	Найти неисправность и устранить ее
Неверная информация о фактическом положении механизма	Неисправность блока ФИ8	То же
Вал двигателя не возвращается в нулевое положение	Неисправность блока ФИ8	

Неисправность	Причина	Способ устранения
Электродвигатель без нагрузки нагревается до температуры 120°C. Горят светодиоды «Стрела», «Двигатель», «Перегрев»; недостаточное ускорение перемещения механизма	Неисправность блока РС2, РТ6	Найти неисправность и устранить ее
Аварийный останов электропривода Горят светодиоды «Стрела», «Двигатель»	Наезд механизма на ограничительный конечный выключатель	Снять ограничение по методике, изложенной в инструкции по эксплуатации УЧПУ
Горит светодиод «Стрела», погас светодиод «Двигатель»	Наезд механизма на аварийный конечный выключатель; исчезновение сигнала готовности УЧПУ Заедание кинематики механизмов подачи станка	Вывести механизм из зоны и устранить сбой УЧПУ по методике, изложенной в инструкции Устранить заедание по методике, изложенной в инструкции по эксплуатации станка
Горит светодиод «Стрела», погас «Двигатель» загорелся «Вопрос»	Замыкание фаз электродвигателя или в соединительных жгутах Неисправность одного из блоков шкафа	Найти и устранить замыкание  Найти неисправность по световой индикации блоков и устранить ее
Светодиоды погасли	Исчезновение напряжения питающей сети	То же

## ЭКТ [12]

Нет напряжения на коммутирующих конденсаторах	Нет импульсов управления на тиристорах инвертора и подзаряда	Проверить работу задающего генератора, проверить контакты разъемов, проверить напряжение на источниках подзаряда
При включении кнопки «Вкл.» срабатывает защита	Пробит тиристор в силовой схеме	Проверить состояние элементов силовой схемы методом прозвонки

Неисправность	Причина	Способ устранения
Нет напряжения на выходе электропривода	Неисправность блока регулирования (БР), формирования импульсов, нет контактов в разъемах	Проверить импульсы управления на силовых транзисторах; проверить напряжение задатчика интенсивности, проверить работу регулятора напряжения и тока; восстановить контакты
<b>ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200</b>		
При подключении преобразователя к питающей сети не горит лампа «Сеть»	Перегорела лампа или предохранители блока БП	Проверить и заменить перегоревшие элементы
Мигает лампа «Работа», нажатие кнопки «Стоп» не прекращает мигания	Неправильный порядок чередования фаз питающей сети Оборвана фаза питающей сети или неисправен один из предохранителей БП	Изменить порядок чередования Проверить и подключить фазу или заменить неисправный предохранитель
Происходит аварийное отключение автоматического выключателя	Короткое замыкание в трансформаторе или соединительных проводах Пробиты тиристоры блока БВ	Проверить и устранить короткое замыкание (КЗ) Проверить и заменить тиристоры
При нажатии кнопки «Пуск» («Вперед») лампа «Работа» загорается, при отпускании — гаснет	Обрыв в цепи задатчика частоты	Проверить и устранить обрыв
Мигает лампа «Работа», нажатие кнопки «Стоп» прекращает мигание	Короткое замыкание в цепи нагрузки Пробит транзистор в блоке БИ или пробит тиристор V15 в блоке БВ Недопустимая перегрузка на выходе	Устранить КЗ Проверить и заменить неисправные пробитые элементы Уменьшить нагрузку на электродвигатель
При нажатии кнопки «Пуск» («Вперед») или «Назад» не горит лампа «Работа»	Перегорела лампа	Заменить лампу
Происходит аварийное отключение автоматического выключателя	Пробиты вентиль V7 или конденсаторы C7...C9 блока БВ	Проверить и заменить пробитые элементы

Неисправность	Причина	Способ устранения
Происходит самопроизвольное отключение преобразователя, лампа «Работа» не мигает	Пробит один из транзисторов V11...V13 и перегорели резисторы R16, R17 в блоке БВ	Проверить и заменить методом, описанным для блока инвертора

## ТПЧ-40 [15]

Ненормальная работа инвертора при включении смежных тиристоров одного плеча моста, при котором вступает в работу токоограничение	Вышел из строя один из вентилей инвертора или обратного моста Происходит самовключение тиристор инвертора вследствие выхода из строя RC-цепи Неправильная работа пересчетной схемы БСУИ	Отыскать неисправный вентиль и заменить его новым Проверить монтаж RC-цепи, места пайки  Отыскать и устранить неполадки в системе управления инвертором
--	---	--

При включении преобразователя перегорают предохранители ПНБ-5	Вышел из строя один из тиристоров выпрямителя Не работает узел токоограничения в блоке управления  Неправильное чередование фаз питающего напряжения системы управления выпрямителем	Отыскать и заменить неисправный тиристор Устранить неисправность в схеме узла токоограничения С помощью осциллографа проверить чередование фаз питающего напряжения СУВ
---	---	---

Двигатель не запускается	Неисправность в задающем устройстве блока управления	Проверить наличие питающего напряжения задающего устройства, исправность транзисторов
--------------------------	--	---

При включенной силовой схеме напряжение на выходе преобразователя достигает максимального значения независимо от положения задающего потенциометра	Неисправен полупроводниковый усилитель блока управления Не работает отрицательная обратная связь по напряжению	Отыскать неисправность в усилителе  Проверить цепь обратной связи по напряжению (трансформатор БОСН—вход усилителя блока управления)
--	---	--

## ЛТЧКШ

Срабатывает максимальная защита преобразователя при включении автомата до нажатия кнопки «Пуск»	Замыкание фазы электрошпинделя или элемента силовой схемы на корпус	С помощью омметра найти место замыкания и устранить
---	---	---

Срабатывает максимальная защита преобразователя через 2—3 с после нажатия кнопки «Пуск»	Обрыв фазы питания электрошпинделя  Обрыв в цепи одного из LC-контуров гашения тиристор	С помощью омметра найти разрыв и устранить обрыв Найти обрыв и устранить; заменить конденсатор
---	---	---



Неисправность	Причина	Способ устранения
Срабатывает максимальная защита преобразователя через 6—7 с после нажатия кнопки «Пуск»	ров, обрыв в одной или нескольких защитных РС-цепях тиристоров, обрыв цепи или выход из строя конденсатора, определяющего темп сброса и нарастания частоты задающего генератора Кроме перечисленных причин—разрыв цепи или выход из строя конденсатора, определяющего темп нарастания напряжения выпрямителя	Найти разрыв и устранить; заменить конденсатор
При 1 нажатии кнопки «Пуск» преобразователь не включается	Разрыв цепи питания реле РП6	Найти разрыв и устранить
При нажатии кнопки «Пуск» и срабатывании реле РП6 нет напряжения на выпрямителе (точки 1—7)	Разрыв цепи задатчика напряжения	То же

«Вопрос», затем «Двигатель», электропривод исправен, а останов был вызван или кратковременным снижением напряжения сети или сбоем в системе (устройстве) ЧПУ. Если же электропривод не работает, то необходимо выявить, где находится неисправность — в электроприводе, в УЧПУ или в станке? Для этого от внешних разъемов шкафа отсоединяются жгуты УЧПУ и станка, вместо них подсоединяется наладочный пульт посредством соединительного жгута и выясняется работоспособность собственно электропривода. Неисправный блок можно определить по индикации светодиодов, помещенных в блоках. Перед этим следует открыть дверь шкафа и подать напряжение сети. Если светит светодиод «Внутр.» (блок АПЗ), то электропривод неисправен, но блок АПЗ работоспособен; если светит светодиод «Внеш.» (блок АПЗ), то неисправна УЧПУ или электроавтоматика станка, или произошел наезд одного из механизмов подачи на аварийный конечный выключатель; свечение светодиодов «ФДТА» или «ФДТВ» (блок РТ6) означает неисправность датчиков тока фазы А или В; если горит светодиод в блоке КЗ1, то электропривод выключился из-за перегрузки инвертора; свечение светодиода блока ПК30 означает, что выключение этого блока произошло из-за перегрузки или внутренней неработоспособности. Необходимо осмотреть неисправный блок на обнаружение повреждений (плохой пайки, обрывов, механических нарушений в плате или ее элементах). Характерные неисправности электропривода и методы их устранения помещены в табл. 11.

Рассмотрим методику, которую необходимо применить при проверке блоков, указанных в графе «Способ устранения». Снимается напряжение с электропривода. Вешается предупредительная табличка. Отключаются провода и разъемы между контролируемым блоком и шкафом; блок вынимается из шкафа. Внешним осмотром проверяется исправность блока. Омметром контролируются электрические соединения внутри блока. Блок ТС1 проверяется следующим образом: блок отсоединяется от разъема «Сеть» шкафа; внешним осмотром проверяется отсутствие повреждений; омметром проверяется отсутствие ложных связей между контактами соединительного жгута.

Для проверки блока КЗ1 отсоединяется его разъем от панели ПМ8. После подачи напряжения сети на электропривод светодиод данного блока не должен светиться. При закорачивании контрольных точек 13 и 14 должен гореть светодиод блока, если этого нет, то блок КЗ1 неработоспособен. Предохранители в цепях транзисторных ключей перегорают при выходе из строя какого-либо силового транзистора. Обнаружение сгоревшего предохранителя при профилактических и ремонтных работах позволяет выявить и заменить неисправный транзистор. Блоки привода Размер 2М-5-2 имеют следующие обозначения: источник питания силовых ключей — ПК30, блок защитный — БЗ1, блок преобразования фазы в импульсы — ФИ8, пульт наладочный — ПМ8. Обозначения других блоков даны в описании привода.

## РЕМОНТ И НАЛАДКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЕРИИ ПМСМ

Разборка и сборка электроприводов серии ПМСМ (1—3-й типы размеров). При разборке следует освободить выходной конец вала агрегата от шкива или другого соединительного устройства; снять щеткодержатель 7 (см. рис. 55, а) в сборе со щеткой; снять щит 6 муфты, равномерно ввинчивая четыре винта М8 в отжимные отверстия (предварительно надо отвинтить винты, крепящие щит к корпусу 2); снять индуктор 5 с катушкой 4 и выходным валом 9 при помощи стяжного приспособления (съёмника), используя при этом два отверстия (отверстие М8 для агрегата привода 1 вида размеров и отверстие М10 для агрегатов приводов 2 и 3 вида размеров), расположенные диаметрально в корпусе индуктора и закрытые винтами с потайной головкой.

Конструкция съёмника должна обеспечивать беспрепятственное движение индуктора (выход индуктора из полости якоря) на расстоянии не менее 40 мм, для чего снять якорь с вала электродвигателя 1, используя предусмотренные для съема отверстия М8 (предварительно надо отвинтить винт, ввернутый в торец вала).

Для изъятия подшипников 10 из индуктора необходимо отвинтить упорную гайку с уплотнением. Затем с помощью двух цилиндрических штифтов, которые вставляются в отверстия, расположенные в корпусе индуктора, выбить подшипники.

Агрегаты приводов 4—6-го типов размеров показаны на рис. 55, б. Для разборки следует снять шкив 14 и вынуть щетки из щеткодержателя 12; отвинтить винты, крепящие щит 18 к корпусу 78 муфты; снять с вала электродвигателя муфту вместе с якорем, индуктором и щитом, ввинчивая два винта в отжимные отверстия М12. Длина нарезанной части винтов должна быть не менее 10 мм.

Для снятия подшипника 16 необходимо снять переднюю крышку 15 и дистанционную втулку (для этого отвинтить гайки, а затем установить их для дальнейшего демонтажа); отвинтить и снять стопорную гайку с шайбой; снять щит в сборе с подшипниковым узлом при помощи съемника.

Для снятия подшипника 3 следует снять соединительную муфту 2; отвинтить стопорную гайку и винты, крепящие крышку 4 якоря; снять крышку якоря в сборе с подшипниковым узлом, используя два отжимных отверстия М10.

Для снятия подшипника 10 необходимо снять упорное кольцо 17, отвинтив стопорный винт; первое контактное кольцо 19 (аналогично снять второе контактное кольцо и диск 20); отвинтить винты, крепящие крышки якоря 9; снять крышку якоря в сборе с подшипниковым узлом, используя два отжимных отверстия М10.

Для смены щеток в приводах 1—3 видов размеров необходимо вывинтить щеткодержатель 7 из корпуса щита 6. Затем отсоединить жгуты щетки от контактного латунного угольника, от-

## 12. ОСНОВНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕРИИ ПМСМ

Неисправность	Причина	Способ устранения
Нагрев подшипникового узла или повышенный шум со стороны подшипника	Выгорание или вытекание смазки	Промыть подшипники, детали узла и заложить новую смазку
Двигатель вращается, вал муфты неподвижен	Нет напряжения на катушке возбуждения муфты; вышел из строя переключатель ПС	Устранить обрыв в цепи щеточного контакта, обрыв в цепи возбуждения обмотки муфты; проверить блок ПМУ, проверить исправность задатчика скорости ПС
Скорость выходного вала муфты максимальна и не регулируется	Неисправен блок ПМУ; нет щеточного контакта в тахогенераторе; обрыв цепи тахогенератора	Проверить исправность тахогенератора и правильность монтажа

винтив контактный винт *М4* и заменить щетку. Для замены щеток в приводах 4—6 видов размеров следует отвинтить колпачок щеткодержателя 12, вынуть щетку вместе с пружиной из щеткодержателя. Заменить щетку, предварительно притерев новые щетки по радиусу 31 мм для приводов 4-го типа размера и 48,5 мм — для привода 6-го типа размера. В приводах 4—6-го типов размеров применены щетки марки МГ-2, размеры которых 5×12, 5×32 мм. В табл. 12 приведены основные неисправности электропривода серии ПМСМ и способы их устранения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Г. И., Босинзон М. А., Кондрикков А. И. Электроприводы главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1980, 150 с.
2. Бай Р. Д., Фельман А. В., Чабанов А. И. Анализ глубокорегулируемых электроприводов постоянного и переменного тока. — Электротехника, 1980, № 8, с. 43—45.
3. Духопельников Б. А. Система импульсно-фазового управления преобразователей с интегрированием управляющего и синхронизирующего напряжений. — Электротехническая промышленность. Выпуск «Преобразовательная техника». 1982, № 7, с. 2.
4. Москаленко А. В. Современные системы электропривода. М.: Высшая школа, 1980. 95 с.
5. Надежность электрооборудования станков / З. В. Тевлян, М. А. Босинзон, Б. З. Брейтер и др. М.: Машиностроение, 1980. 168 с.
6. Песков П. П., Розман Я. Б., Сомонов В. И. Электрооборудование станков для электрохимической обработки. М.: Машиностроение, 1977, 153 с.
7. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности. М.: Энергия, 1976, 352 с.
8. Правила устройств электроустановок. М.: Энергия, 1978. 120 с.
9. Преображенский В. И. Полупроводниковые выпрямители. М.: Энергия, 1978. 120 с.
10. Регулируемый привод постоянного тока для универсальных станков и станков с ЧПУ / Г. И. Андреев, А. М. Лебедев, Я. Б. Розман и др. М.: НИИМАШ, 1976. 58 с.
11. Розман Я. Б. Электропривод с магнито-тиристорными преобразователями для станков. М.: Машиностроение, 1976. 183 с.
12. Серия комплектных тиристорных электроприводов на базе автономных инверторов напряжения / В. Я. Таран, В. Н. Сухарев, Ю. Н. Гричина и др. Промышленная энергетика, 1979, № 4, с. 37—38.
13. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / Под ред. М. Г. Зименкова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 480 с.
14. Эффективность применения высокомоментных двигателей в станкостроении / Э. Г. Королев, И. А. Волкомирский, А. М. Лебедев и др. М.: Машиностроение, 1981. 144 с.
15. Яцук В. Г. Серия тиристорных преобразователей частоты общепромышленного назначения мощностью до 100 кВА. — В кн.: Автоматизированный электропривод, М.: МДНТП, 1972 с. 123—129.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Общие сведения об электроприводе</b>	<b>3</b>
Классификация электроприводов	6
Характеристики регулируемых приводов	6
Надежность электроприводов	8
<b>Электродвигатели станочных приводов</b>	<b>9</b>
Электродвигатели постоянного тока	9
Дискретные двигатели	14
Электродвигатели переменного тока	16
<b>Преобразователи электроприводов постоянного тока</b>	<b>22</b>
Устройство и свойства тиристоров	23
Работа управляемых выпрямителей	25
Специальные полупроводниковые элементы	31
Охлаждение вентиляей	31
Защита преобразователей электроприводов	32
<b>Автоматическое управление и регулирование электропривода</b>	<b>33</b>
Общие сведения	33
Типовые режимы работы электропривода	39
<b>Регулируемые электроприводы постоянного тока общепромышленных серий</b>	<b>44</b>
Система магнитный усилитель—двигатель	45
Электроприводы серии ПМУ-П	50
Нереверсивные однофазные тиристорные электроприводы серий ЭТО1, ЭТО2, ЭТОШ1, ЭТОШ2	51
Электроприводы серий ПТЗ и ПТЗР	52
Электроприводы серии ПТР-0,4М	54
Электроприводы серий ЭТ1Е и ЭТ1Т	55
<b>Электроприводы постоянного тока для универсальных станков и станков с ЧПУ</b>	<b>61</b>
Электроприводы серии ЭТЗР	62
Электроприводы серии ЭТШР	64
Электроприводы серии ЭТЗИ	65
Электроприводы серии ЭТ6	70
Электроприводы серии БУ3609	74
Электроприводы серии ЭТУ3601	75
Электроприводы серии ЭШИР-1	80
Электроприводы главного движения	81
<b>Электроприводы переменного тока промышленных серий</b>	<b>93</b>
Электроприводы серии ПМС и ПМСМ	94
Тиристорные устройства управления пуско-тормозными режимами и частотой вращения асинхронных двигателей	100
Элементы систем управления	102
Работа силовых транзисторов в преобразователях	107
Преобразователи частоты и широтно-импульсные преобразователи	111
Асинхронные электроприводы с частотным управлением	124
Преобразователи серии ППЧ	130
Преобразователи частоты типа ПТЧКШ	132

Преобразователи серии ПЧ-4-200 и ПЧ-3,5-3200 . . . . .	134
Электроприводы серии ЭКТ (ЭКТР) . . . . .	140
Следящий электропривод подачи для станков с ЧПУ типа Размер 2М-5-2 . . . . .	145
<b>Электроприводы с дискретным и вентильным двигателями</b> . . . . .	148
Электроприводы с дискретным двигателем . . . . .	148
Электроприводы с вентильным двигателем . . . . .	152
<b>Эксплуатация электроприводов постоянного тока</b> . . . . .	153
Монтаж электроприводов . . . . .	153
Эксплуатация электроприводов . . . . .	156
Ремонт электроприводов . . . . .	161
Наладка электроприводов . . . . .	170
<b>Эксплуатация электроприводов переменного тока</b> . . . . .	184
Монтаж электроприводов . . . . .	184
Ремонт и наладка преобразователей частоты . . . . .	191
Ремонт и наладка электроприводов серии ПМСМ . . . . .	201
<b>Список литературы</b> . . . . .	204

75 коп.

« МАШИНОСТРОЕНИЕ »

