

**Электронный конспект лекций  
по курсу  
«Мехатроника и автоматизация  
средств механизации»**

**Автор курса  
доц. каф. АППиЭ  
Карпович Д.С.**

**Минск 2022**

## Тема 1. Классификация и характеристика грузов

Ежедневно в мире перемещают миллионы тонн различной товарной продукции (сырья, топлива, полуфабрикатов, готовых изделий, продукции сельского хозяйства), насчитывающей свыше пяти тысяч наименований. С момента предъявления к перевозке на станции (пункте) отправления и до момента доставки и сдачи получателю товарная продукция называется грузом.

Некоторое количество грузов, которые погружают, транспортируют, выгружают и хранят как единую массу, называют грузовой единицей. Грузовая единица — это элемент логистики, который своими параметрами связывает технологические процессы участников логистического процесса в единое целое. Формироваться грузовая единица может как на производстве, так и на складах.

Отдельные грузы обладают присущими только им физико-химическими свойствами, объемно-массовыми характеристиками, степенью опасности, определяющими технические условия перевозок. В комплексе с параметрами тары и упаковки специфические свойства груза составляют понятие транспортной характеристика.

Транспортная характеристика груза определяет режимы погрузки, перевозки, хранения, а также требования к техническим средствам, выполняющим эти операции. Такие характеристики позволяют эффективно использовать материально-техническую базу участников логистического процесса на всех этапах движения материального потока: при выборе типа подвижного состава, складского оборудования, средств пакетирования грузов, разработке условий их перевозки и т. д.

Частичное изменение транспортной характеристики груза может привести к изменению элементов перевозочного процесса. Так, переход от перевозки насыпью к перевозке в таре (например, цемент или минеральные удобрения) потребует использования других типов подвижного состава, средств механизации погрузочно-разгрузочных работ, применения упаковочных материалов. Вместе с тем разработка рациональных схем технологических перевозок грузов предусматривает принятие мер по изменению отдельных составляющих транспортной характеристики: вида тары и упаковки, линейных размеров, влажности и т. д.

### Классификация грузов

Классификация грузов отражает те их свойства, которые определяют различные стороны процесса их перевозки и хранения. Необходимость **классификации** диктуется взаимосвязью транспорта и погрузочно-разгрузочных машин с качественными и количественными характеристиками грузов.

В соответствии со свойствами грузов, определяющими различные стороны транспортного процесса их перевозки, грузы классифицируются по отраслевому признаку, по видам продукции, по виду тары, массе, размерам, способу погрузки и выгрузки, величине отправок, признакам специфических свойств, степени опасности, условиям использования транспортных средств и др.

Группировка грузов по отраслевому признаку является укрупненной и позволяет решать задачи анализа, планирования и прогнозирования перевозок. Для рациональной организации транспортного процесса грузы группируют по отдельным признакам.

На железнодорожном и автомобильном транспорте различают транспортную классификацию в зависимости от грузов, типа упаковки и способов, обеспечивающих сохранность товаров и классификацию, применяемую для нормирования и учета погрузочно-разгрузочных работ.

Примеры классификации грузов представлены на рис. 1.1—1.5.

В зависимости от специфических свойств и условий транспортирования грузы классифицируют на 11 групп.

*Первую группу* составляют скоропортящиеся грузы; они требуют защиты от действия высоких или низких температур. К ним относятся Продукты полеводства, садоводства, животноводства, птица и рыба.

Во *вторую группу* включены грузы, способные поглощать свободную влагу воздуха (они гигроскопичны). Это приводит к изменению массы, объема, физико-химических свойств, порче. К таким грузам относятся соль, сахар, цемент, хлопок и др.

К *третьей группе* отнесены грузы, аккумулирующие посторонние запахи (продукты перемола, чай, сахар), что может привести к порче продукта.

В *четвертую группу* включены грузы, которые обладают специфическими запахами и при совместном хранении или перевозке могут привести к порче (рыбодукты, кожсырье, табачные изделия, нефтепродукты).

*Пятую группу* составляют грузы, устойчиво сохраняющие свои характерные физико-химические свойства в процессе перевозки и хранения (минерально-строительные материалы, руды черных и цветных металлов, каменный уголь, лесоматериалы и т. д.).

В *шестую группу* включены навалочные грузы, теряющие при транспортировке свойства

сыпучести в результате смерзания или спекания (колчедан, гранулированный шлак, каменный уголь, калийная соль).

Седьмая группа состоит из слеживающихся навалочных грузов, у которых при длительном хранении или перевозке происходит потеря подвижности в результате давления верхних слоев груза (цемент, глина, фосфоритная мука, торф).



Рис. 1.1. Классификация грузов по видам продукции

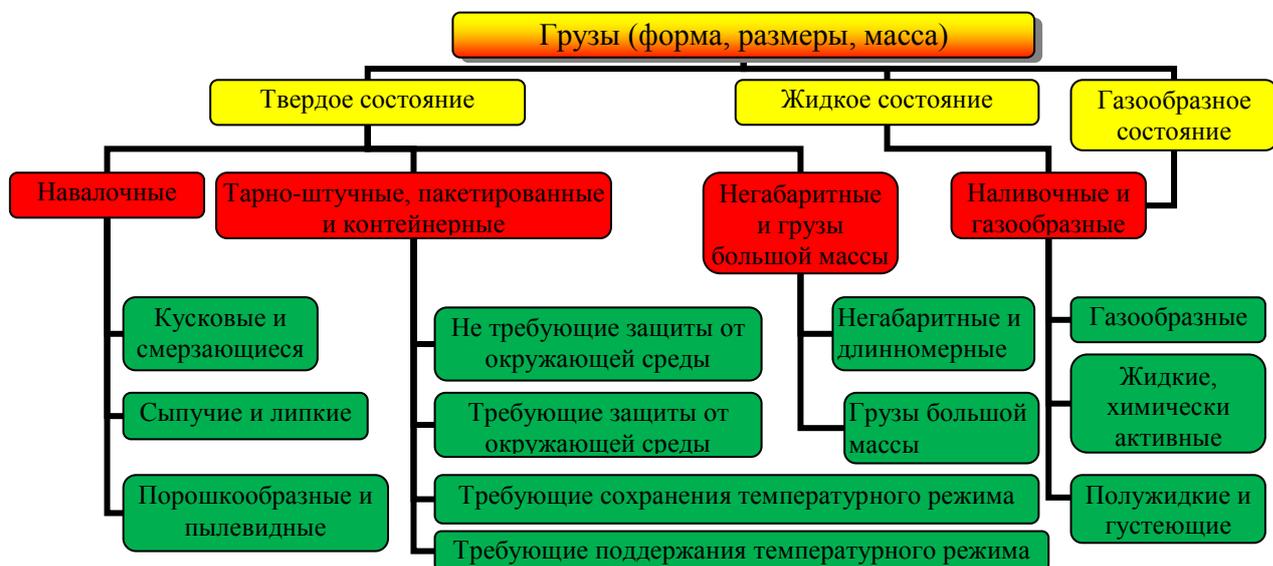


Рис. 1.2. Классификация грузов по физическим (химическим) свойствам:

I—по физическому состоянию; II—по приспособленности к выполнению погрузочно-разгрузочных работ; III—по обобщающий физико-механическим и химическим свойствам, сохранности при обращении с грузами

В восьмую группу объединены опасные грузы. Эти грузы могут стать причиной пожара, взрыва, отравления или ожогов людей или животных, а также вызвать порчу или повреждение других грузов, подвижного состава, устройств и сооружений. К опасным грузам относятся: способные к образованию взрывчатых смесей; сжатые и сжиженные газы; самовозгорающиеся вещества: возгорающиеся от действия воды; легковоспламеняющиеся; едкие; ядовитые; радиоактивные; сильнодействующие ядовитые; взрывчатые и предметы, ими снаряженные.

Девятую группу составляют грузы, которые в процессе перевозки и хранения способны к потере массы — овощи, бахчевые, мясные продукты и др.



Рис. 1.3. Классификация грузов по требованиям, предъявляемым к конструкции автотранспортных средств: гамма — коэффициент использования грузоподъемности

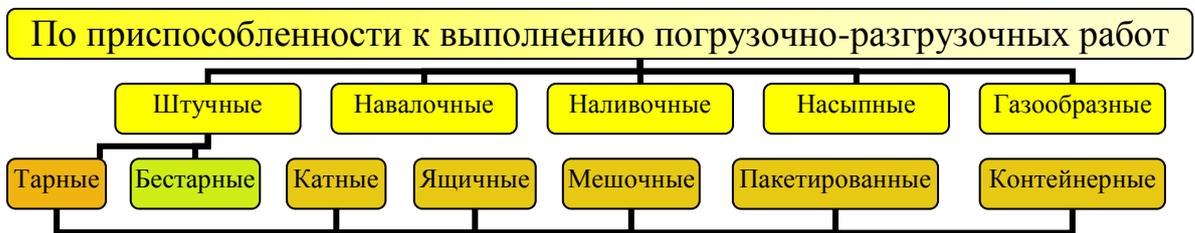


Рис. 1.4. Классификация грузов по условиям выполнения погрузочно-разгрузочных работ



Рис. 1.5. Классификация грузов по условиям и способам хранения

К *десятой группе* отнесена живность.

В *одиннадцатую группу* объединена машиностроительная продукция.

Для нормирования, финансирования и учета погрузочно-разгрузочных работ грузы делятся на группы:

- тарно-упаковочные и штучные;
- мясные;
- хлебобулочные;
- тяжеловесные: грузы в упаковке и без упаковки (машины, контейнеры, железобетон) массой одного места более 250 кг; катно-бочковые грузы массой одного места более 500 кг;
- металлы и металлические изделия;
- лесоматериалы;
- огнеупорные грузы;
- зерновые грузы россыпью;
- овощные грузы россыпью;
- навалочные грузы.

### **Номенклатура грузов**

Отнесение груза к той или другой номенклатуре (перечню) позволяет установить: уровень тарифа на перевозку, порядок планирования перевозки данного груза, возможность его перевозки на открытом подвижном составе, необходимость промывки вагона после выгрузки и т. д.

Рассмотрим основные номенклатуры грузов, действующие на железнодорожном транспорте.

Единая тарифно-статистическая номенклатура служит для установления тарифного класса груза и в конечном счете для определения провозных плат и сборов, а также в планировании и учете перевозок. В качестве критериев для разработки единой тарифно-статистической номенклатуры приняты способы производства или характер происхождения отдельных видов продукции.

Для планирования и учета погрузки грузы объединяют по определенному признаку так, чтобы номенклатура охватывала основную массу грузов, была краткой, сопоставимой, позволяла определить условия транспортировки, выбрать тип подвижного состава, а также чтобы в процессе планирования обеспечивала возможность выявления нерациональных перевозок.

Перевозка значительной части грузов разрешена на открытом подвижном составе. В основном это промышленная продукция, не подверженная вредному воздействию атмосферных осадков, а также изделия, которые по своим габаритам нельзя поместить в крытые вагоны. Грузы, перевозимые на открытом подвижном составе, в зависимости от основных свойств, способов размещения и крепления подразделяются на три группы.

В *первой группе* объединены сыпучие и кусковые материалы, перевозимые навалом, минерально-строительные, каменный уголь, руда, торф и т. д. Дополнительного закрепления они не требуют, а их устойчивость в процессе транспортирования обеспечивают борта платформы и стенки полувагонов.

*Вторую группу* составляют штучные грузы: машины, станки, кабель и т. д. После погрузки их закрепляют в соответствии с техническими условиями погрузки и крепления грузов.

В *третью группу* входят штабельные грузы, представляющие собой однородные по геометрической форме и размерам предметы, укладываемые в несколько ярусов по высоте и в один или несколько штабелей по длине. После погрузки штабеля увязывают и закрепляют.

### **Маркировка и кодирование грузов**

Маркировка дает возможность: установить принадлежность отдельных грузовых единиц к той или иной партии грузов; выявить пункт назначения и наименование получателя, не прибегая к перевозочным документам; обратить внимание персонала на специфические свойства грузов.

*Маркировка* — это текст, условное обозначение и рисунки на упаковке, информирующие о способах обращения с грузом при его транспортировании и хранении. Маркировка производится краской, наклеиванием ярлыков, прикреплением бирок в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 14192-96 (введен в качестве стандарта РФ с 1.01.98г.) и содержит манипуляционные знаки (специальная маркировка); основные, дополнительные и информационные надписи (грузовая и транспортная маркировка).

*Товарная маркировка* предназначена для информации торговых организаций и покупателей. Она наносится на внутреннюю упаковку изготовителем изделия. В ней указываются название, тип, сорт, артикул, цвет, дата выпуска и другие характеристики товара.

В *транспортной маркировке* содержится: число грузовых мест в партии и их порядковый номер, указываемый дробью. Сведения даются при перевозке разнородных или разносортных грузов в

однотипной таре или однотипных грузов в разнотипной таре, а также при перевозке комплектов оборудования или транспортировании с перевалкой.

При нанесении маркировки на бумажные, картонные, фанерные, металлические и другие ярлыки размер их должен быть не менее 60 см<sup>2</sup> с соотношением сторон 3:2.

На грузовые места с опасными грузами наносится *специальная маркировка*, характеризующая категорию опасности. Если грузовое место содержит грузы разной категории опасности, на нем должно быть соответствующее число ярлыков опасности.

Грузовую и специальную маркировку ставит грузоотправитель.

В специальной маркировке (манипуляционные знаки) делаются особые указания по обращению с грузом при перевозке, хранении и при выполнении погрузочно-разгрузочных работ. Специальная маркировка осуществляется нанесением на груз условных (манипуляционных) знаков (рис. 1.6).

*Манипуляционные знаки* наносят на каждое грузовое место и располагают в левом верхнем углу на двух соседних стенках тары, на бочках и барабанах — на одном из днищ или обечайке.

Знаки «место строповки», «место подъема», «центр тяжести», располагают по указывающему их месту.

*Основные надписи* грузовой маркировки содержат: полное или условное наименование грузополучателя; наименование пункта назначения с указанием (при необходимости) станции перегрузки. *Дополнительные надписи* грузовой маркировки содержат: полное или условное наименование грузоотправителя; пункт отправления, станцию и сокращенное название железной дороги отправителя. Грузовая маркировка может включать информационные надписи: масса брутто и нетто, кг; габаритные размеры, см; объем грузового места, м<sup>3</sup>

Маркировка производится краской, хорошо удерживающейся на любой поверхности, нестирающейся и неотслаивающейся, несмываемой водой, светостойкой, и должна быть нанесена одним из следующих способов: типографским, печатанием на принтере, штемпелеванием по трафарету, продавливанием, выжиганием.

Марка должна быть ясной, четкой, понятной, устойчивой от внешних воздействий и не должна портить груз.

Для автоматизированного сбора информации и эффективного управления грузовыми потоками, обеспечения ритмичности поставок, размеров имеющихся запасов, скорости реализации и потребления используются штриховые коды разных видов.

На рис. 1.7, а показан код с прямоугольным контуром (код ITF — 14), который используется для кодирования товарных партий и применяется на гофрированных упаковках.

В сфере обращения широкое применение получил код EAN, который часто можно встретить на товарах массового потребления (рис. 1.7. б).

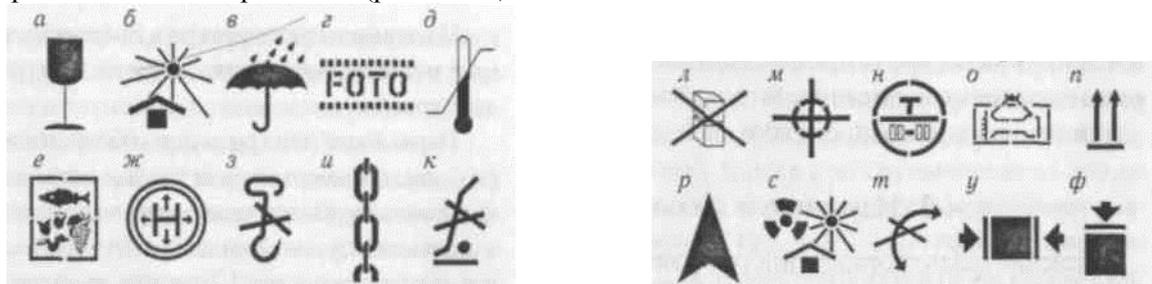


Рис. 1.6. Манипуляционные знаки: а — хрупкое, осторожно; б — беречь от нагрева; в — беречь от влаги; г — беречь от излучения; д — ограничение температуры; е — скоропортящийся груз; ж — герметичная упаковка; з — крюками не брать; и — место строповки; к — здесь поднимать тележкой запрещается; л — штабелировать запрещается; м — центр тяжести; н — тропическая упаковка; о — поднимать непосредственно за груз; п — вверх; р — открывать здесь; с — беречь от тепла и радиоактивного излучения; т — не катить; у — зажимать здесь; ф — штабелирование ограничено



Рис. 1.7. Штрих-коды: а — код ITF-14; б — код EAN

## Тема 2. Типы конвейеров

### ЛЕНТОЧНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Ленточные конвейеры предназначены для транспортирования преимущественно сыпучих или штучных грузов (небольшой массы).

Эти конвейеры состоят из рабочего органа в виде замкнутой конвейерной ленты, являющейся грузонесущим и тяговым элементом, опор, приводного и хвостового барабанов, натяжного устройства, загрузочного устройства и рамы. При необходимости предусматриваются направляющие ролики и отклоняющие барабаны для ленты, разгрузочные устройства, устройства для очистки ленты.

Привод осуществляется от электродвигателя через редуктор. При необходимости предусматривается тормоз или останов для предотвращения самопроизвольного движения рабочего органа в обратном направлении. Схемы ленточных конвейеров см. на рис. 6.1.

### НОРМАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Угол наклона конвейера. Наибольший угол наклона принимается на  $10...15^\circ$  меньше угла трения груза о ленту.

Скорость ленты. Номинальные скорости (м/с) по ГОСТ 22644—77 должны выбираться из ряда: 0,25; 0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0. Допускается отклонение скорости в пределах  $\pm 10\%$ .

Скорость стальной конвейерной ленты рекомендуется принимать до 1 м/с.

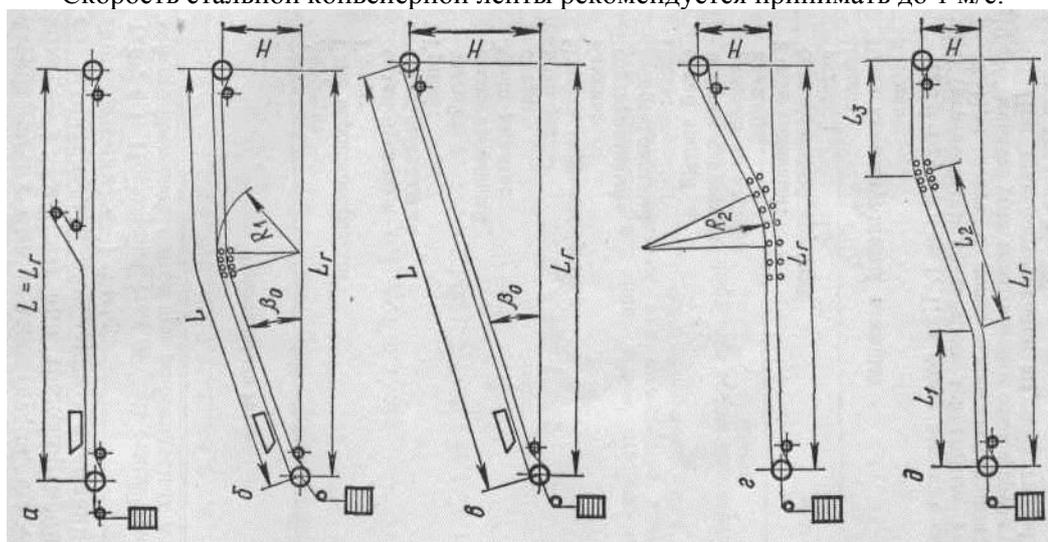


Рис. 6.1. Схемы ленточных конвейеров:

а — горизонтального с разгрузочной тележкой; б — наклонно-горизонтального; в — наклонного; г — горизонтально-наклонного; д — горизонтально-наклонно-горизонтального;  $L$  — длина конвейера;  $L_r$  и  $H$  — длины проекций трассы;  $L_1, L_2, L_3$  — длины отдельных участков;  $\beta_0$  — угол наклона конвейера (участка конвейера)

### КРУТОНАКЛОННЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Крутонаклонными называются конвейеры, у которых грузонесущее полотно имеет угол подъема, больший критического (при котором груз на гладком грузонесущем полотне еще не имеет гравитационного перемещения).

Возможны следующие способы удержания груза на грузонесущем элементе: путем повышения коэффициента сцепления груза с поверхностью полотна, увеличения давления груза на полотно, создания подпора груза на полотне.

По роду перемещаемых грузов различают крутонаклонные конвейеры для насыпных и штучных грузов. По количеству тяговых элементов могут быть конвейеры с одним, двумя и четырьмя тяговыми элементами.

Получили распространение крутонаклонные конвейеры со специальными лентами, ленточно-цепные, пластинчатые и двухленточные конвейеры.

В конвейерах со специальными лентами последние снабжены выступами (рифлением) или перегородками, обеспечивающими удерживание груза на ленте, наклоненной под углом  $30...60^\circ$ .

В ленточно-цепных конвейерах функции тягового и грузонесущего элементов разделены соответственно между цепью и лентой (рис. 7.1). Конвейер состоит из пластинчатой или, чаще, кругло-звенной цепи 1, снабженной опорными площадками 2, на которых лежит лента 3.

Желобчатую форму ленте придают роlikоопоры 4 без среднего роliка, на месте которого проходит тяговая цепь, движущаяся на катках 6 по направляющим путям 5. Лента приводится в движение только за счет трения между ней и опорной площадкой цепи (фрикционная связь). Крутонаклонные ленточно-цепные конвейеры различают: по количеству цепей — одно- и двухцепные; по способу соединения ленты с цепью — с фрикционной или жесткой связью; по типу ходовых элементов — с ходовыми или стационарными роliками; по относительному расположению ленты и цепи — с внутренним или внешним расположением. Есть конвейеры, в которых лента является тяговым органом, а цепь удерживает груз от сползания с ленты. В качестве крутонаклонного может использоваться обычный пластинчатый конвейер с бортовым или коробчатым настилом (угол наклона  $45...60^\circ$ ).

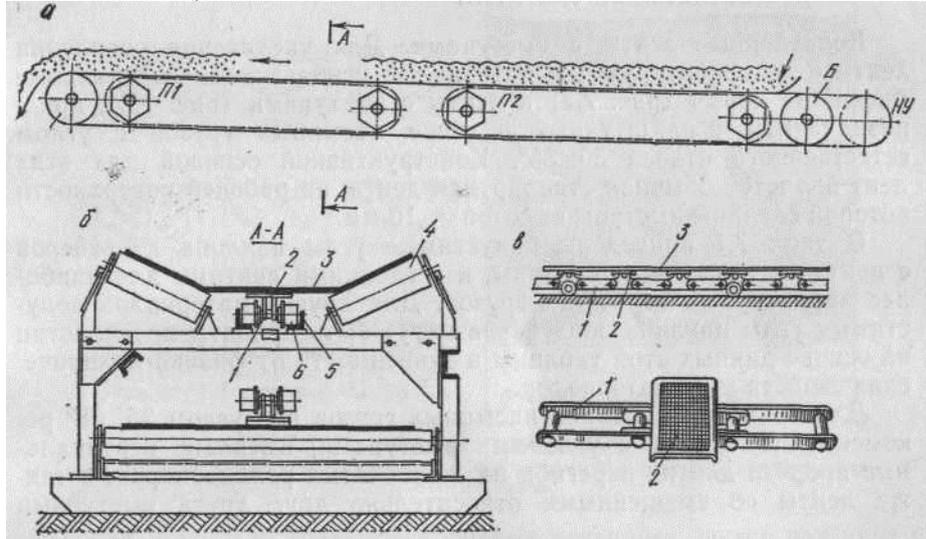


Рис. 7.1. Ленточно-цепной конвейер:

а — схема; б — поперечное сечение; в — ходовая часть; Б — оборотный барабан; П1 и П2 — приводные механизмы; НУ — натяжное устройство

#### ПЛАСТИНЧАТЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Пластинчатые конвейеры предназначены для транспортирования острокрайных или горячих материалов, кусковых или штучных грузов (рис. 8.1).

Эти конвейеры состоят из тягового органа (в виде одной или двух бесконечных тяговых цепей) с прикрепленным к нему настилом из отдельных пластин, приводного и натяжного устройств, загрузочного устройства и рамы. При плоском настиле возможно наличие и разгрузочного устройства в виде плужкового сбрасывателя. Привод наиболее часто осуществляется от электродвигателя через редуктор.

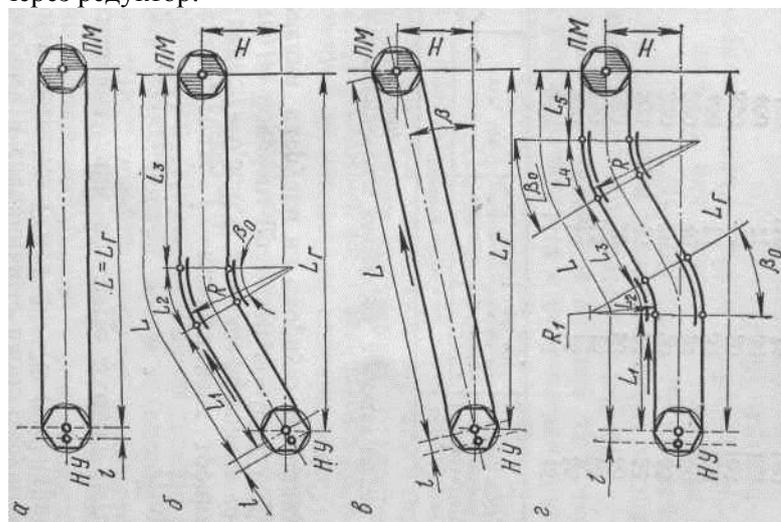


Рис. 8.1. Схемы пластинчатых конвейеров: а — горизонтального; б — наклонно-горизонтального; в — наклонного; г — горизонтально-наклонно-горизонтального; ПМ — приводной механизм; НУ — натяжное устройство

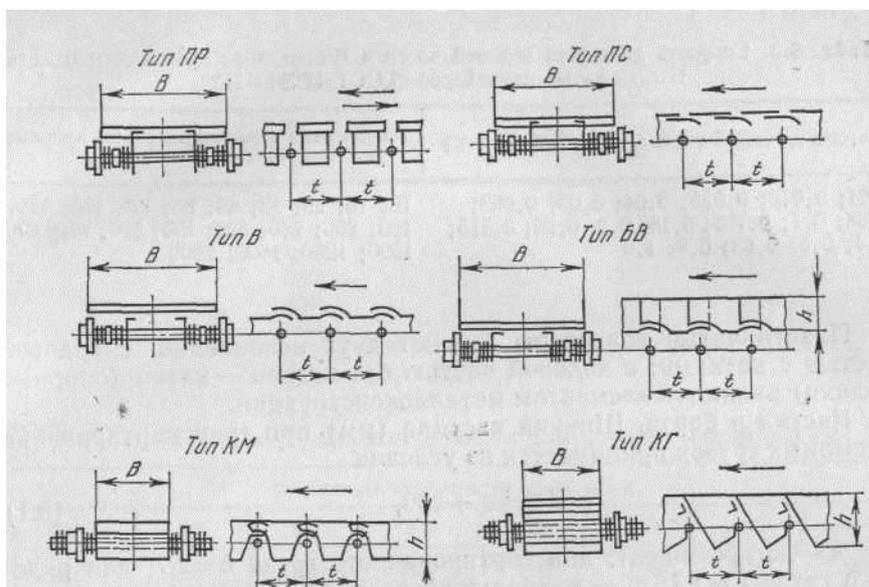


Рис. 8.2. Типы пластинчатых конвейеров (к табл. 8.1)

Табл. 8.1. Типы пластинчатых конвейеров (ГОСТ 22281—76) и область их применения

Обозначение типа конвейера	Тип конвейера	Область применения
ПР	Плоский разомкнутый	Для транспортирования штучных грузов
ПС В	Плоский сомкнутый Безбортовой волнистый	Для транспортирования штучных и насыпных (кусковых) грузов
БВ	Бортовой волнистый	Для транспортирования насыпных и штучных грузов
КМ КГ	Коробчатый мелкий Коробчатый глубокий	Для транспортирования насыпных грузов

### СКРЕБКОВЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Скребковым называется конвейер, где груз транспортируется по желобу или другому направляющему устройству движущимися скребками, прикрепленными к тяговому элементу. Различают конвейеры со сплошными и контурными (фигурными) скребками. Сплошные скребки бывают высокими (их высота примерно равна высоте желоба) и низкими (их высота в несколько раз меньше высоты желоба). Применяются также трубчатые конвейеры с круглыми (иногда прямоугольными) скребками. В зависимости от характера движения различают скребковые конвейеры с непрерывным поступательным и с возвратно-поступательным движением тягового элемента.

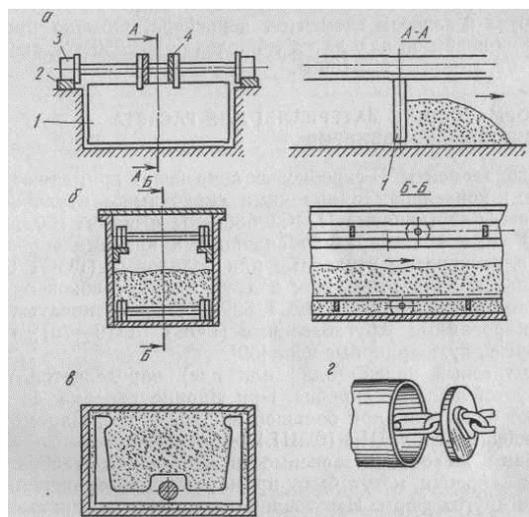


Рис. 9.1. Схема скребковых конвейеров:

а — с высокими сплошными скребками; б — с низкими погруженными скребками; в — с контурными скребками; г — трубчатый конвейер

На рис. 9.1 показаны схемы некоторых распространенных типов конвейеров с непрерывным поступательным движением. Конвейеры (рис. 9.1, а) порционного волочения груза с высокими сплошными скребками состоят из скребков 1, прикрепленных к цепи 4, ходовые катки 3 которой перемещаются по направляющим 2. Конвейеры сплошного волочения груза с низкими скребками показаны на рис. 9.1, б, конвейер с контурными скребками — на рис. 9.1, в, схема трубчатого конвейера — на рис. 9.1, г.

Конвейеры с высокими скребками используются для транспортирования материалов, крошение которых не снижает их качества, или для не крошащихся грузов. Конвейеры с низкими скребками имеют большее распространение, так как перемещение материала происходит с меньшим его измельчением.

Производительность, скорость движения и длина скребковых конвейеров ограничиваются значительным сопротивлением перемещению груза и износом элементов конвейера. Обычно производительность конвейеров находится в пределах 50...350 т/ч, скорость — 0,16...1,0 м/с, длина — 60...100 м.

### ПОДВЕСНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Подвесным называется конвейер с тяговым элементом в виде цепи или каната, на котором укреплены каретки с подвесками для транспортирования груза, движущиеся по подвешенному жесткому пути.

Подвесные конвейеры предназначаются для транспортирования штучных грузов (иногда насыпных грузов в таре) по замкнутому контуру пространственной или одноплоскостной, например горизонтальной, трассы.

В зависимости от типа тягового элемента подвесные конвейеры делятся на цепные (наиболее распространенные) и канатные. По способу перемещения грузов различают подвесные конвейеры грузонесущие (рис. 10.1, а), толкающие (рис. 10.1, б), грузоведущие (рис. 10.1, в). Цепь 5 связана с каретками 3, имеющими ходовые катки, которые перемещаются по тяговым подвесным путям 4. Они обычно прикреплены к частям здания. Цепь приводится в движение с помощью звездочки или гусеничного привода.

У грузонесущих конвейеров каретки соединены с подвесками 2, на которых установлены грузы / . У толкающих конвейеров цепи 5, перемещающиеся по тяговым путям 4, выполнены с кулачками 6, которые толкают подвески 2 с тележками (каретками) 7, перемещающимися на грузовом подвесном пути 8. Каретки 3 грузоведущих (грузотянущих) конвейеров соединены со штангами 9 напольных тележек 10 с перемещаемыми грузами.

На рис. 10.1, г изображена схема пространственного подвесного конвейера, трасса которого разбита на отдельные характерные участки, ограниченные точками, обозначенными цифрами. Для поворота направляющего подвесного пути в горизонтальной плоскости используются специальные поворотные устройства в виде звездочек, блоков, роликовых батарей и направляющих путей (участки 'б, 8, 12, 14, 4). Повороты в вертикальной плоскости осуществляются вертикальными плавными перегибами направляющего пути (участки 2, 10). Первоначальное натяжение тягового органа создается натяжным устройством, обычно грузовым (участок 4). Наибольшее применение нашли грузонесущие конвейеры.

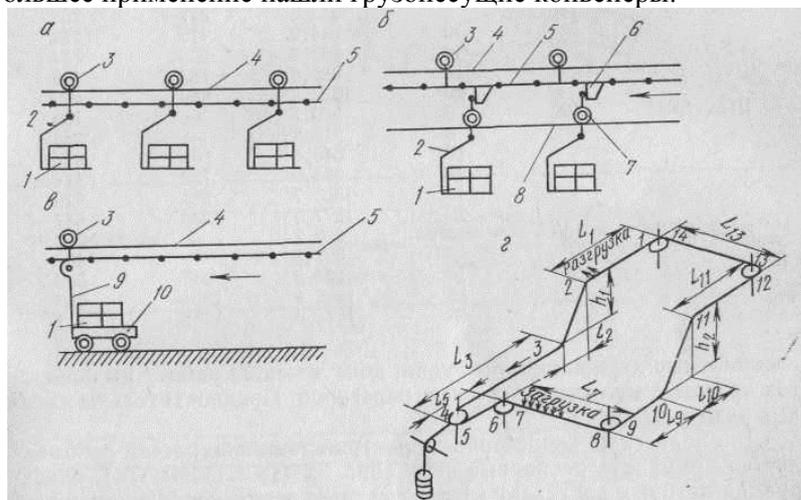


Рис. 10.1. Схема подвесных конвейеров:

а - грузонесущего; б - грузотолкающего; в - грузоведущего; г-схема трассы подвесного конвейера

## ТЕЛЕЖЕЧНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Тележечным называется конвейер, грузонесущим элементом которого являются тележки-платформы, связанные с тяговым элементом и двигающиеся по направляющим. Тележечные конвейеры делятся на вертикально-замкнутые и горизонтально-замкнутые.

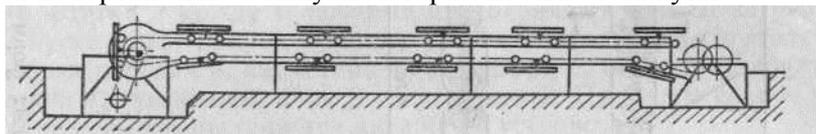


Рис. 11.1. Схема вертикально-замкнутого конвейера с опрокидывающимися тележками. Выбор типа конвейера зависит от характеристики перемещаемого груза, характера обслуживаемого технологического процесса и планировки производственного помещения.

Вертикально-замкнутые конвейеры применяются обычно на сборочных операциях тяжелых и громоздких изделий (моторов, автомашин, тракторов, их узлов и др.). Горизонтально-замкнутые конвейеры применяются для транспортирования легких малогабаритных изделий, а также в технологических цепях (например, конвейеры испытательных станций, литейные и др.).

Габариты и масса транспортируемого груза определяют основные параметры тележечного конвейера — грузоподъемность и размеры тележки. Грузы, как правило, располагают длинной стороной вдоль продольной оси конвейера. Соотношение длины  $L$  и ширины  $B$  тележки рекомендуется принимать в пределах 1,25...2.

Вертикально-замкнутые конвейеры могут быть с опрокидывающимися и неопрокидывающимися тележками. В первом случае при колее тележки меньше четырех шагов цепи используется одна тяговая цепь, в остальных случаях — две.

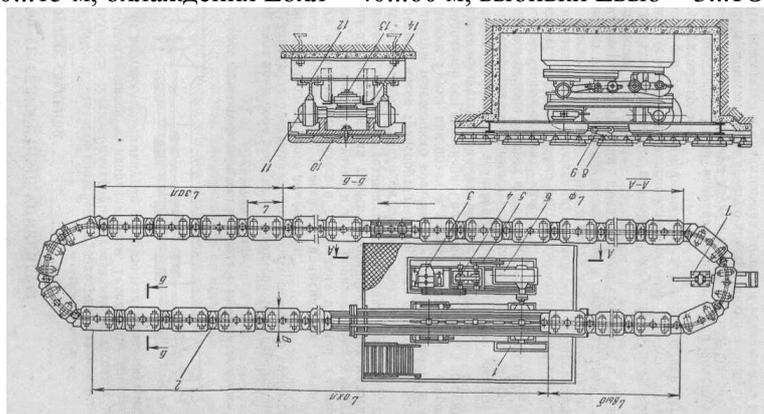
На рис. 11.1 показана схема вертикально-замкнутого конвейера с опрокидывающимися тележками. Конвейеры с неопрокидывающимися тележками всегда должны иметь две тяговые цепи. Их трасса может быть только прямолинейной и горизонтальной. Они имеют малое распространение из-за высокой стоимости и сложности конструкции.

Горизонтально-замкнутые конвейеры могут иметь центральное и боковое (смещенное) расположение тяговой цепи относительно продольной оси тележки (применяются для перемещения легких и малогабаритных грузов).

В зависимости от числа направляющих путей и конструкции тележек различают конвейеры двух- и однорельсовые. Однорельсовые конвейеры имеют более простую конструкцию и меньшую стоимость. Их недостатки — значительная высота и возможность бокового качания тележки. Они применяются в качестве литейных

конвейеров для легких форм массой до 300 кг. Более широко распространены двухрельсовые тележечные конвейеры с нижним центральным расположением тяговой цепи. На рис. 11.2 показан горизонтально-замкнутый тележечный конвейер для литейных форм. Он состоит из тяговой цепи 13, к которой жестко прикреплены двухкатковые тележки с платформами 10, перемещающиеся по рельсам 12. Направляющие 14 предотвращают боковое смещение полотна. Щитки 2 между тележками предохраняют цепь от загрязнения. Гусеничный привод полотна состоит из электродвигателя 3, ременных передач 5, вариатора 4, редуктора 6, открытой зубчатой передачи 1, гусеничной цепи 9 с кулаками 8. Предварительное натяжение цепи осуществляется натяжным устройством 7.

Для литейных конвейеров длина отдельных участков определяется продолжительностью технологических процессов. Обычно участок формовки и сборки имеет длину  $L_{\text{ф}} = 30...50$  м, заливки  $L_{\text{зал}} = 10...15$  м, охлаждения  $L_{\text{охл}} = 40...60$  м, выбивки  $L_{\text{выб}} = 3...10$  м.



## ЭЛЕВАТОРЫ КОВШОВЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ

Элеваторы (табл. 12.1...12.4) предназначены для подъема насыпных грузов на высоту до 50 м. Они состоят из тягового органа (в виде замкнутой конвейерной ленты или одной или двух тяговых цепей) с жестко прикрепленными к нему ковшами, приводного и натяжного устройств, загрузочного и разгрузочного башмаков и кожуха (рис. 12.1). Привод осуществляется от электродвигателя через редуктор. Предусматривается тормоз или останов для предотвращения самопроизвольного движения рабочего органа в обратном направлении.

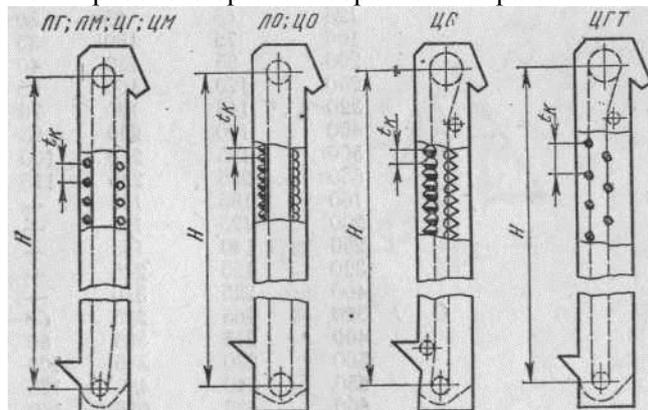


Рис. 12.1. Типы ковшовых элеваторов Глубокие Мелкие Остроугольные Скругленные

## ВИНТОВЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Винтовой конвейер стационарный общего назначения предназначен для транспортирования сыпучих, мелкокусковых, вязких и тестообразных материалов на расстояние до 30...40 м. Он включает (рис. 13.1) винт (в качестве рабочего органа), неподвижный желоб, загрузочное и разгрузочное устройства и привод. Вал винта имеет концевые и промежуточные (подвесные) опоры. Одна концевая опора должна иметь упорный подшипник и располагаться так, чтобы от действующей на винт осевой силы вал винта работал на растяжение.

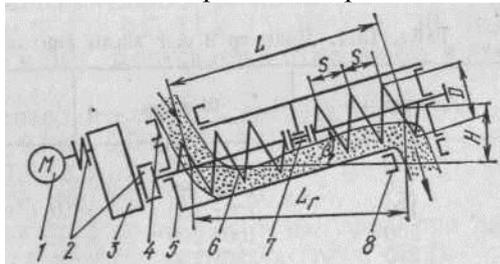


Рис. 13.1. Схема винтового конвейера:

1 — двигатель; 2 — муфты; 3 — редуктор; 4 — загрузочный люк; 5 — желоб; 6 — винт; 7 — подшипник подвесной; 8 — разгрузочный люк

Согласно ГОСТ 2037—82, винтовые конвейеры бывают: с горизонтальным (Г) или наклонным (Н) желобом, с постоянным (Щ) или переменным (П2) диаметром винта, с постоянным (П3) или переменным (ГЦ) шагом винта, с однозаходным (1) или двухзаходным (2) винтом, с правым (П), левым (Л) или комбинированным (К) направлением спирали винта.

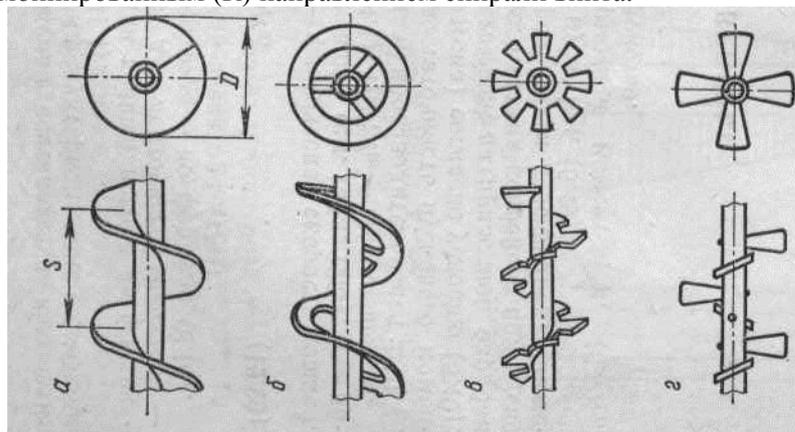


Рис. 13.2. Конструкции винтов

Винты конвейера бывают (рис. 13.2, а — г): сплошные — для транспортирования

нележывающихся насыпных мелкозернистых и порошковых грузов (цемента, мела, гипса, золы, сухого песка и др.); ленточные — для транспортирования насыпных мелкокусковых грузов (гравия, песчаника, известняка и пр.) фасонные — для транспортирования тестообразных грузов (глины, бетона, цементного раствора и пр.); лопастные — для транспортирования тестообразных грузов с одновременным интенсивным их перемешиванием.

#### Глава 14. РОЛИКОВЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Роликовые конвейеры предназначены для транспортировки штучных грузов. Они состоят из последовательно расположенных на раме вращающихся роликов, по которым перемещается груз. Трасса конвейера может быть прямолинейной или криволинейной.

Роликовые конвейеры различают: по приводу — приводные (рис. 14.1) (ролики приводятся во вращение от двигателя) и неприводные; по степени подвижности — стационарные (или переносные) и передвижные (на колесах); по направлению трассы — прямолинейные, прямолинейные с криволинейными участками и разветвляющиеся (с переводными стрелками или с поворотными кругами); по конструкции рамы — со сплошной рамой или секционные.

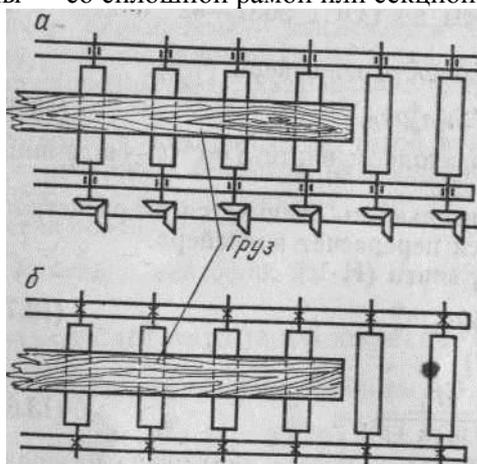


Рис. 14.1. Схемы роликовых конвейеров:  
а — приводного; б — неприводного

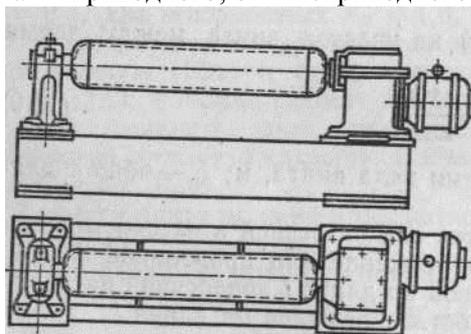


Рис. 14.2. Ролик с индивидуальным приводом

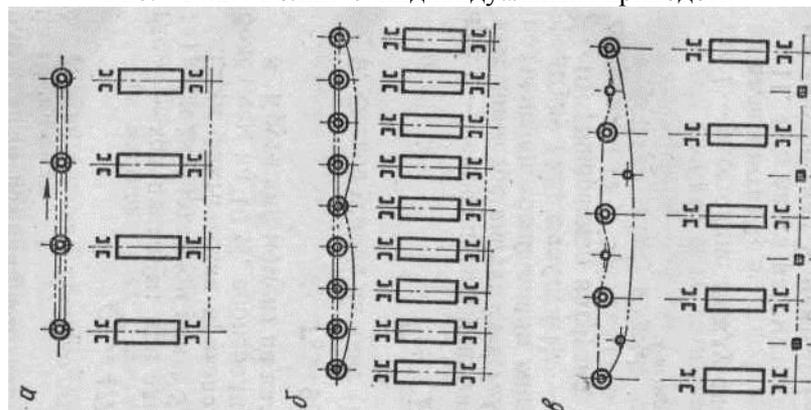


Рис. 14.3. Ролики с групповым приводом:

а — передача от ролика к ролику; б — передача секциями; в — передача одной цепью  
Привод роликов приводных конвейеров бывает: индивидуальный (рис. 14.2); групповой — через продольный вал с коническими колесами (рис. 14.1, а)', через цепи или через ремни (рис. 14.3).

Неприводные конвейеры (рис. 14.4) обычно — гравитационные, у которых движущей силой является продольная составляющая веса груза, находящегося на роликах наклонно (вниз) установленного конвейера.

Неприводные роликовые конвейеры бывают однорядные — КРО и многорядные — КРМ (собираются с роликами, указанными в табл. 14.2), а рольки — цилиндрические (рис. 14.1, 14.3) и дисковые (рис. 14.5).

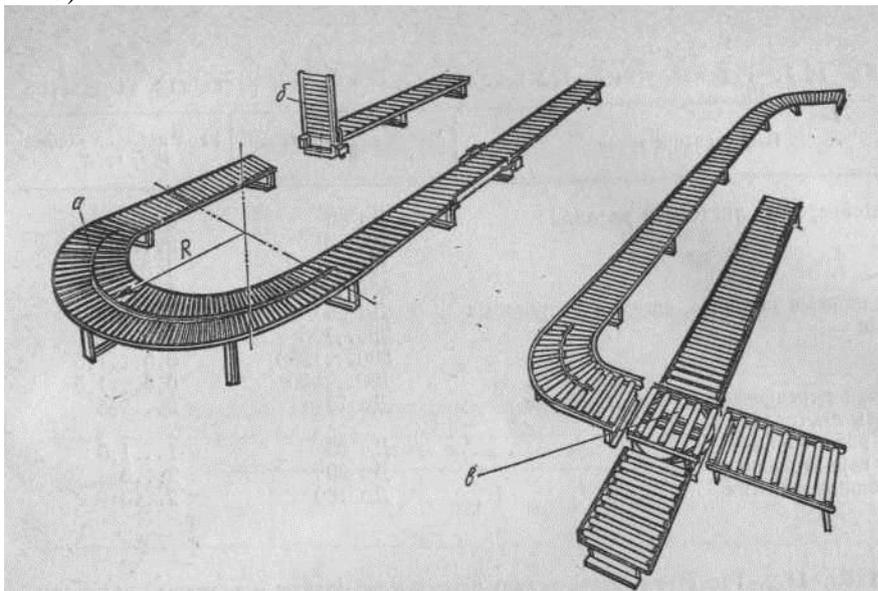


Рис. 14.4. Неприводные роликовые конвейеры:  
а — криволинейный участок; б — подъемная секция; в — поворотный круг

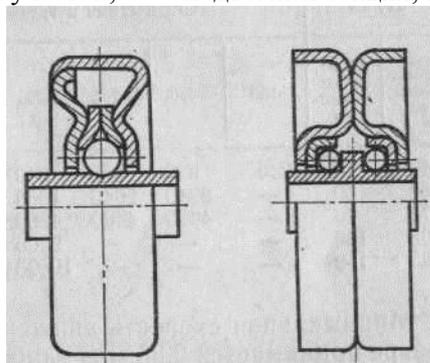


Рис. 14.5. Дисковые ролики

#### КАЧАЮЩИЕСЯ КОНВЕЙЕРЫ

Качающимся называется конвейер, представляющий собой подвешенный или опирающийся на неподвижную раму желоб (трубу), который совершает колебательные движения для перемещения груза, находящегося в желобе (трубе).

Качающийся конвейер, в котором перемещение груза осуществляется силами инерции без отрыва его от желоба, называется инерционным. В этих конвейерах амплитуда колебаний желоба составляет 10...150 мм, а частота—0,67...6,67 колебаний в секунду.

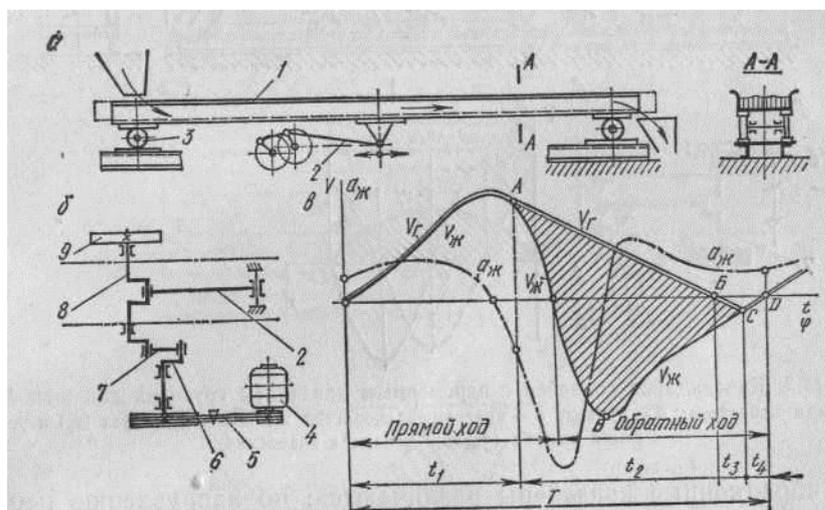


Рис. 15.1. Качающийся конвейер с постоянным давлением груза на дно желоба:

а — схема конвейера; б — схема двухкривошипного привода; в — диаграмма скоростей желоба ( $v_{ж}$ ), груза ( $v_{р}$ ) и ускорения желоба ( $a_{ж}$ )

Качающийся конвейер, в котором перемещение груза осуществляется микробросками с отрывом части груза от желоба, называется вибрационным. В этих конвейерах амплитуда колебаний не превышает 0,5...15 мм, а частота — более 7,5...50 колебаний в секунду.

Различают инерционные конвейеры с постоянным и переменным давлением груза на дно желоба.

Конвейер с постоянным давлением груза (рис. 15.1) состоит из желоба 1, опорных катков 3 и двухкривошипного привода (рис. 15.1, б). Привод состоит из шатуна 2, коленчатого вала 8, соединительной планки 7, кривошипа 6, клиноременной передачи 5, электродвигателя 4 и маховика 9. При такой кинематической схеме обеспечивается прямолинейное переменное-возвратное движение желоба и перемещение вперед находящегося в нем груза.

Конвейер с переменным давлением груза (рис. 15.2) состоит из желоба 1, упругих стоек 4, жестко прикрепленных к желобу и опорной раме под углом  $\rho$  к вертикали, рамы 5 и кривошипного привода (рис. 15.2, б), включающего шатун 2, двигатель 5, клиноременную передачу 6, коленчатый вал 7, маховик 8. На рис. 15.2 в представлена диаграмма скоростей желоба  $v_{ж}$ , груза  $v_{р}$  и ускорения желоба  $a_{ж}$ . При такой схеме конвейера давление груза на желоб при прямом и обратном ходе различно.

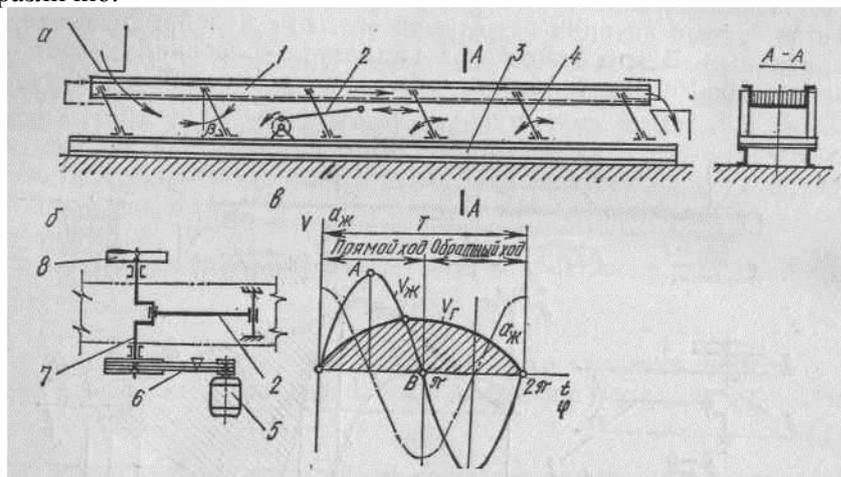


Рис. 15.2. Качающийся конвейер с переменным давлением груза на дно желоба: а — схема конвейера; б — привод; в — диаграмма скоростей желоба ( $v_{ж}$ ), груза ( $v_{р}$ ) и ускорения желоба ( $a_{ж}$ );  $T$  — период колебаний

Вибрационные конвейеры различаются: по направлению перемещения груза — горизонтальные, пологонаклонные и вертикальные; по способу крепления грузонесущего элемента — на свободных упругих подвесках-амортизаторах и на наклонных направляющих стойках; по количеству одновременно колеблющихся масс — одно-массные, двухмассные, многомассные; по динамической уравновешенности — неуравновешенные и уравновешенные; по количеству грузонесущих элементов (желобов или труб) — одноэлементные и двухэлементные; по характеристике и настройке упругой системы — с резонансной, дорезонансной или зарезонансной

настройкой. На рис. 15.3 приведены схемы основных типов вибрационных конвейеров.

Вибрационный конвейер подвесной конструкции со свободно колеблющейся одномассной системой (рис. 15.3, а) состоит из грузонесущего элемента 1 (труба или желоб), свободно подвешенного на амортизаторах 2 и получающего направленные колебания от электромеханического центробежного привода— вибратора 3, расположенного под углом  $\rho$  к направлению колебания (обычно  $\rho = 20...30^\circ$ ) ниже (сплошная линия) или выше (штриховая линия)

грузонесущего элемента. В другом конструктивном варианте грузонесущий элемент может опираться на амортизаторы.

Широко применяются горизонтальные двухтрубчатые динамически уравновешенные виброконвейеры на упругих стойках (рис. 15.3, б). Когда одна труба движется вперед, другая — назад, но в обеих трубах груз всегда движется в одном (заданном) направлении. Кривошипно-шатунный механизм нагружен незначительно, так как колеблющаяся масса имеет резонансную настройку. Груз движется в сторону отклонения нижнего шарнира коромысла по отношению к вертикальной плоскости, проходящей через верхний шарнир. В конвейере на схеме рис. 15.3, в уравновешивающим элементом является специальная балка.

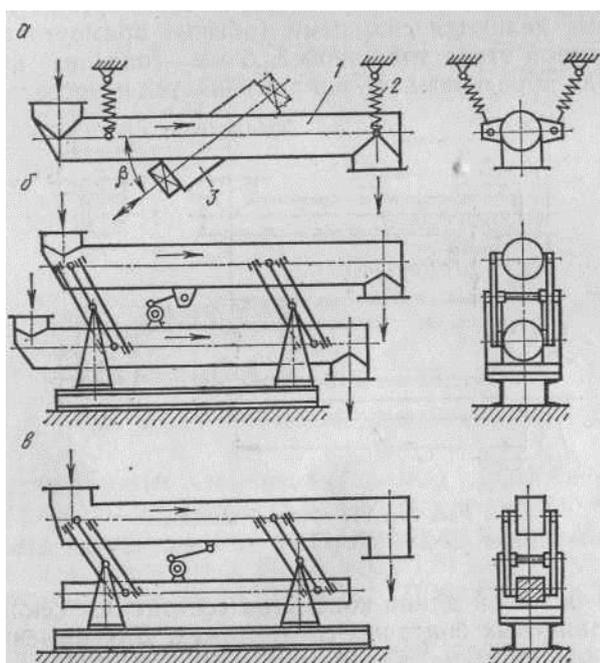


Рис. 15.3. Схемы вибрационных конвейеров:

а — однотрубный на пружинных подвесках с электровибратором; б — двухтрубный на упругих стойках с эксцентриковым вибратором; в — однотрубный на упругих стойках с эксцентриковым вибратором и уравновешивающей балкой

Наиболее перспективными являются вибрационные конвейеры, в которых груз не крошится, не пылит и почти не вызывает изнашивание желоба. Применение инерционных конвейеров ограничено из-за повышенного износа желоба, вызываемого постоянным трением груза о его стенки, высоких динамических нагрузок и неуравновешенности машины. Из инерционных чаще применяются конвейеры с переменным давлением груза на дно желоба.

Областью применения качающихся конвейеров является герметичное транспортирование пылящих, горячих, химически агрессивных насыпных грузов. Эти конвейеры не могут транспортировать липкие грузы и плохо транспортируют тонкодисперсные пылевидные грузы (например, цемент).

### Тема 3. Типовые схемы управления конвейерами

Обычно движение конвейеров происходит в одном направлении при постоянной или мало изменяющейся скорости. Основным режимом работы приводных двигателей является продолжительный режим с редкими пусками и остановками, при диапазоне регулирования скорости, не превышающем 2:1.

Эти механизмы как правило работают на открытом воздухе, в местах с большой запыленностью, с влажной или агрессивной средой, в условиях резкого колебания температуры. Поэтому особенностью работы этих механизмов являются повышенные моменты сопротивления при трогании.

Как правило, используются двигатели закрытого исполнения с повышенным пусковым моментом. Большинство конвейеров снабжены электроприводом переменного тока с асинхронным к.з. ротором или с контактными кольцами.

Простейшие одиночные конвейеры приводятся асинхронными двигателями, управляемыми магнитными пускателями или автоматами с максимальной и тепловой защитой от перегрузки.

В мощных одиночных конвейерах используются двигатели с фазными ротором и магнитными станциями.

Наиболее сложны схемы управления конвейерами ПТС. При совместно работающих конвейерах должна предусматриваться блокировка, обеспечивающая пуск и остановку двигателей без возникновения завала транспортируемого груза.

Запускают двигатели конвейеров в последовательности, обратной направлению движения груза, а остановку линии начинают отключением двигателя конвейера, с которого поступает груз на последующие конвейеры.

Полная остановка линии может произойти при одновременном отключении двигателей.

По команде на остановку прекращается поступление груза на головной конвейер и по истечении времени, необходимого для прохождения грузом всей трассы линии, все двигатели автоматически отключаются.

При остановке какого-либо конвейера двигатели всех конвейеров, подающих груз на остановившийся конвейер, должны остановиться, а следующие за ним конвейеры могут продолжать работать.

Реле контроля скорости барабана натяжной станции контролирует исправное состояние тянущего элемента. В случае обрыва или соскальзывания ленты с ведущего барабана приводной станции реле контроля скорости дает команду на отключение двигателя.

Управление конвейерами ПТС может быть:

- централизованным – дистанционно с диспетчерского пункта
- местным – при выполнении наладочных работ или при ликвидации завалов.

При централизованном управлении изменение режима работы происходит по команде диспетчера, который воздействует на универсальный переключатель или кнопку диспетчерского пульта. Поступившая в схему команда обрабатывается автоматически при соблюдении всех требований технологического процесса.

Местное управление двигателем конвейера осуществляется при помощи кнопок «Пуск» и «Стоп», расположенных вдоль трассы конвейера. При местном управлении исключается соответствующей блокировкой централизованное управление, и наоборот.

Схемой управления группой конвейеров предусмотрена сигнализация. Звуковая сигнализация предупреждает обслуживающий персонал о предстоящем пуске. При аварийной остановке конвейера или возникновении завала диспетчер извещается сигналом звонка. На mnemonic схеме диспетчерского пункта управления световая сигнализация информирует о работе конвейеров и других механизмов, входящих в ПТС. Аварийная звуковая и световая сигнализации позволяют быстро обнаружить неисправность и исключить возникновение завала, который может привести к остановке всего производства.

*Схема управления групповым электроприводом с одновременным пуском электродвигателей.* В конвейерных линиях небольшой производительности, когда возможные завалы не приводят к нарушению технологического процесса производства и легко ликвидируются вручную, применяют простейшие схемы управления двигателями. На рис. 3.1 приведена схема управления двигателями линии, состоящей из трех конвейеров. В качестве приводных двигателей используют асинхронные с к.з. ротором двигатели. Включение двигателей осуществляется контакторами К1 – К3. Последовательность включения двигателей, исключая завал транспортируемого груза, обеспечивается включением катушек контакторов через главный контакт контактора

последующего конвейера. При воздействии на пусковую кнопку КнП включается К1 и запускает двигатель М1 хвостового конвейера. Через замкнувшийся силовой контакт К1 образуется цепь питания катушки контактора К2, пускающего двигатель М2 среднего конвейера. Напряжение к двигателю М3 головного конвейера, который снабжает грузом второй и третий, подводится контактором К3, катушка которого может обтекаться током только при работающем М2. Чтобы остановить линию, достаточно воздействовать на одну из кнопок стоп КнС – КнС3, расположенных на трассе и отключающих контактор К1. Остальные контакторы выключаются вслед за К1 силовыми контактами последующих контакторов.

Предусмотренная тепловая защита РТ1-РТ6 отключает перегруженный двигатель. При этом останавливается не только конвейер с перегруженным двигателем, но и предыдущие, с которых поступает транспортируемый груз. Последующие конвейеры при этом остаются работающими.

Схема обеспечивает световую сигнализацию, указывающую, в каком состоянии находятся двигатели: включенная зеленая лампа ЛС31-ЛС33 указывает на отключенное состояние двигателя, красная ЛСК1-ЛСК3 – на рабочее состояние.

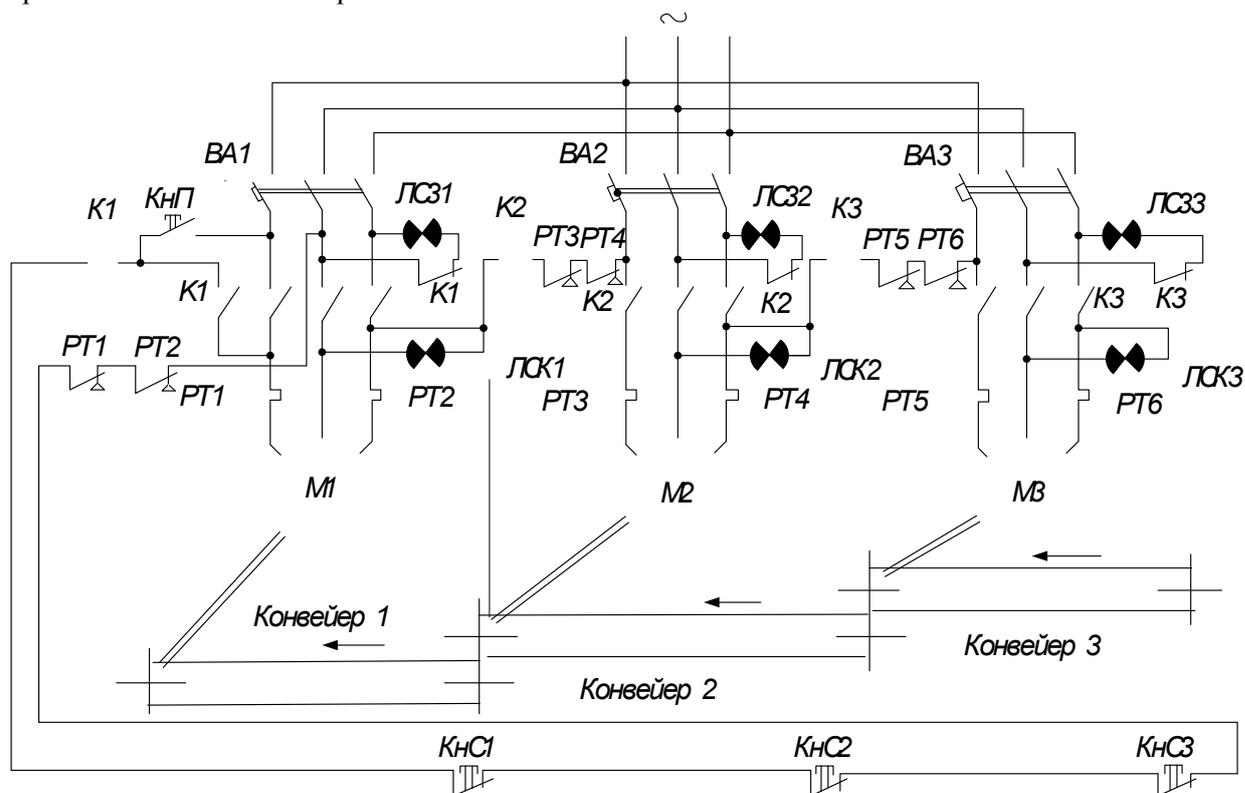


Рис. 3.1. Схема управления конвейерной линией.

Схема управления групповым электроприводом с пуском в функции скорости. В конвейерных линиях большой производительности с большим числом конвейеров, в которых возникновение завала приводит к остановке ПТС и нарушению технологического цикла производства, используют сложные схемы группового электропривода с современными блокировками, обеспечивающими надежную работу линии.

На рис. 3.2 приведена принципиальная схема управления асинхронными к.з. двигателями четырехконвейерной линии. Централизованное управление электродвигателями осуществляется дистанционно с диспетчерского пульта. Включение двигателей конвейерной линии не одновременно и происходит в функции скорости, т.е. каждый последующий двигатель включается после того, как предыдущий достиг номинальной скорости.

При наладочных работах возможно местное управление кнопками КнПМ и КнСМ, расположенными в непосредственной близости от конвейера. Переход с централизованного управления на местное осуществляется универсальным переключателем режима работы – ПУ1. При режиме местного управления (ПУ1 находится в положении «Мест»), включенным оказывается промежуточное реле РП, замыкающиеся контакты которого готовят пусковые цепи катушек включающих контакторов КЛ1-КЛ4 для управления двигателями с места. На рис. Показана силовая схема и схема включения катушки включающего контактора одного из двигателей конвейера.

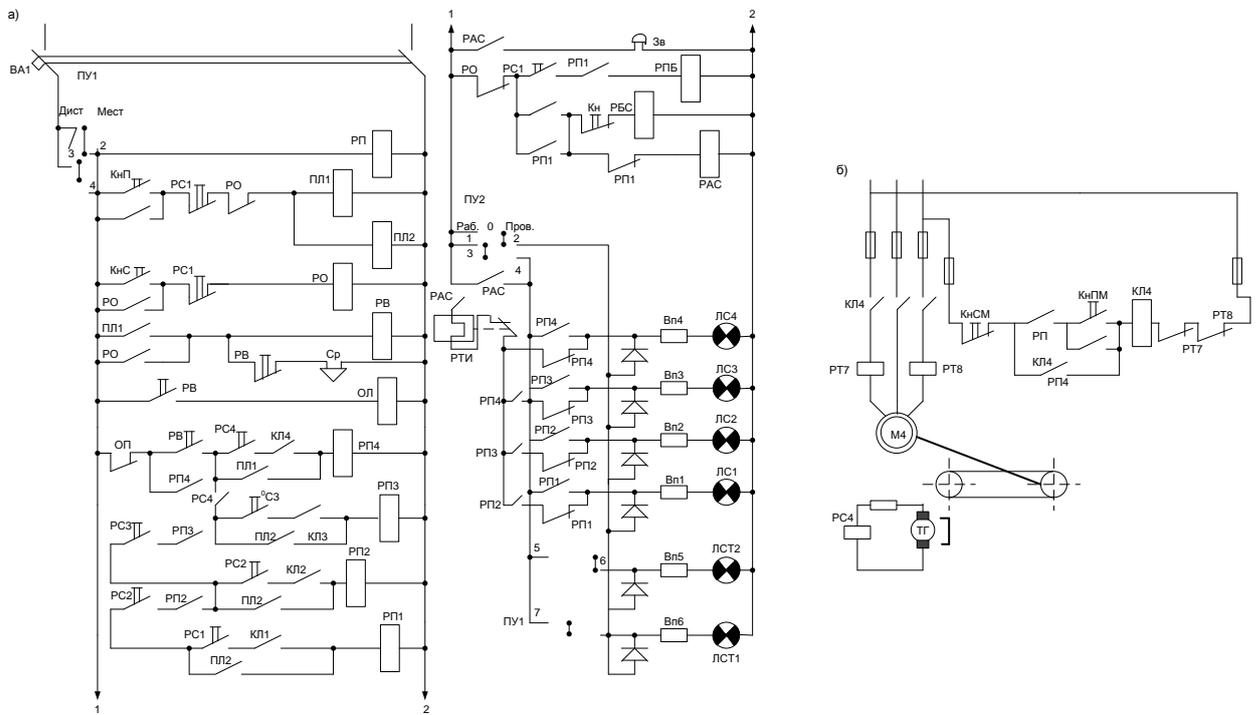
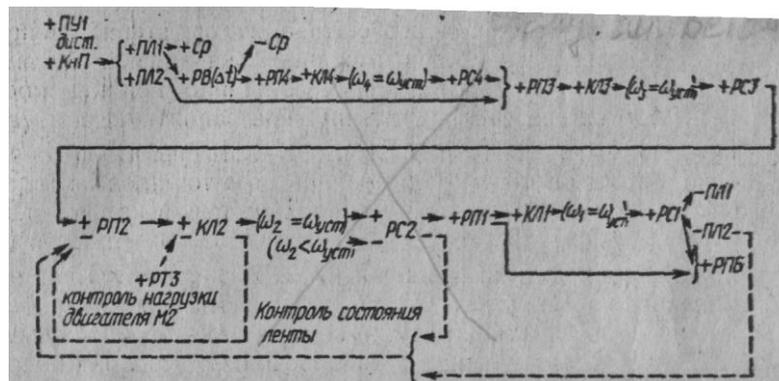


Рис. 3.2. Групповой электропривод с пуском в функции скорости

При дистанционном управлении с пульта диспетчера ПУ1 находится в положении «Дист». При воздействии на кнопку «Пуск» КнП подается команда на пуск линии транспортеров. При этом получают питание реле пуска линии ПЛ1 и ПЛ2. Контакты ПЛ1 шунтируют пусковую кнопку, включают сирену Ср предупредительной сигнализации и подают питание на моторное реле времени РВ. Последнее с некоторой выдержкой времени контактом РВ прекращает подачу звукового сигнала, а другим контактом включает промежуточное реле РП4 управления транспортера, расположенного последним по направлению грузопотока. Замыкающий контакт реле РП4 включает контактор КЛ4, подводящий напряжение к статорной обмотке двигателя М4. Пуск двигателя М3 предыдущего конвейера будет возможным только при достижении двигателем М4 номинальной скорости, при которой реле контроля скорости РС4, установленное на запущенном в ход конвейере, своим замыкающим контактом создаст цепь включения промежуточного реле управления РП3. Реле РП3 включает контактор КЛ3, запускающий двигатель М3.

Двигатели последующих конвейеров включаются аналогично изложенному. После пуска головного конвейера его реле скорости РС1 отключит реле пуска линии ПЛ1 и ПЛ2, которые разомкнут свои контакты в цепи катушек промежуточных реле РП1-РП4. Однако реле РП1-РП4 останутся включенными благодаря замкнутым контактам соответствующих реле скорости РС1 – РС4, контролируют при этом рабочее состояние тянущего полотна.

Последовательность работы схемы управления при пуске линии с диспетчерского пульта поясняется записью:



При длительной перегрузке двигателя или остановке ленты конвейера отключаются двигатели конвейеров, расположенных до аварийного (по ходу груза), а двигатели последующих конвейеров продолжают работать. Так, например, при перегрузке двигателя М2 тепловые реле РТ3, РТ4 воздействуют на контактор КЛ2, отключающий двигатель от сети. Повторное включение

двигателя при возврате тепловых реле в исходное состояние и замыкании их контактов в цепи катушки КЛ2 исключается разрывом блок контакта КЛ2 цепи питания реле РП2, которое, в свою очередь, ликвидирует блокирующую цепь катушки реле РП1, которое через контактор КЛ1 отключает двигатель М1 предыдущего конвейера. При этом цепи управления двигателями М3 и М4 остаются без изменения. Последовательность работы аппаратов схемы характеризуется записью:

+ПУ1  
дист.  
+РТ3 → КЛ2 – РП2 → РП1 → КМ  
→ РПБ

*Система управления с согласованным движением конвейеров.*

Для включения двигателей необходимо установить роторы преобразователя частоты и двигателей в синфазное положение, при котором наводимые в роторе двигателей э.д.с. компенсируются э.д.с. преобразователя частоты. Поэтому при нажатии пусковой кнопки КнП реле РП срабатывает и вначале включает линейный контактор КЛ1, который через ограничивающий резистор R подводит напряжение только к двум фазам статорных обмоток ПЧ, М1 и М2. Такое включение приводит роторы в синфазное положение при строго ограниченном моменте двигателей. Контакт встроенного в контактор КЛ1 реле времени, после отсчета установленной выдержки времени, включает контактор КЛ2, который подает трехфазное питание двигателям М1, М2 и преобразователю частоты. Но так как частоты напряжений питания статора и ротора  $f_1$  и  $f_2$  будут одинаковы, двигатели останутся неподвижными.

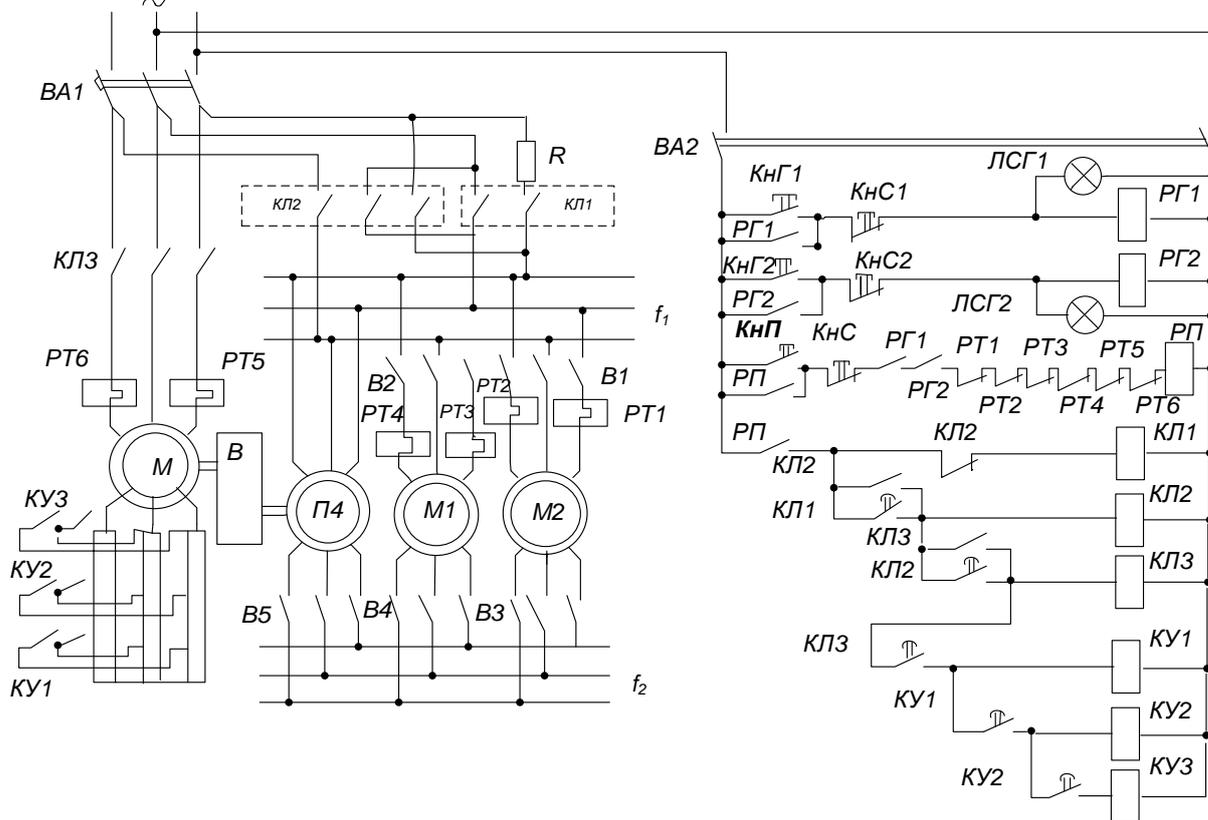


Рис. 3.3. Схема группового электропривода с согласованным движением конвейеров

Затем с выдержкой времени включается контактор КЛ3, подключающий к сети двигатель преобразователя. Пуск двигателя М реостатный и контролируется по принципу независимой выдержки времени контакторами ускорения КУ1 – КУ3. По мере разбега двигателя М частота напряжения преобразователя уменьшается, что вызывает согласованное вращение двигателей конвейеров.

При необходимости регулирования скорости согласованно работающих конвейеров достаточно изменить при помощи вариатора скорость ПЧ. Останавливают линию с помощью кнопок КнС – КнС2, расположенных на пульте управления линией и на рабочих местах.

При перегрузке двигателей линии предусмотрена тепловая защита с реле РТ1 – РТ6, действующими на реле РП, которое в свою очередь отключает линию.

Характерной особенностью работы различных по своему назначению установок, станков, машин и агрегатов является строго повторяемая очередность технологических и транспортных операций. С этой точки зрения все движение рабочих органов машины можно разделить на определенные кинематические виды движений, а именно: шаговое движение рабочего органа, возвратно-поступательное движение, движение с переменной длиной хода рабочего органа и т. д. Эта особенность позволяет заранее синтезировать автоматические схемы управления этими движениями.

**Схемы управления шаговым движением механизмов.** На рис. 3.4 приведена схема управления с использованием командоаппарата, который воздействует на  $SQ1$  и  $SQ2$ . В схеме рис. 3.4 используется блокировочное реле  $K$ , которое готовит очередное включение контактора  $KM$  и затем отключается в середине хода механизма. Универсальный переключатель  $SM2$  служит для ручного управления контактора  $KM$ . Реле  $KV$  обеспечивает нулевую защиту.

В схеме рис. 3.5 применена одна цепь командоаппарата  $SQ1$  реле времени  $KT$ , контакт которого шунтирует цепь  $SQ1$  в момент начала очередного шага механизма.

На рис. 3.6 показан вариант схемы с подачей импульсной команды на 1 шаг контактом реле  $KQ$ .

**Схема управления возвратно-поступательным движением механизма.** В большинстве случаев механизмы совершают возвратно-поступательное движение рабочих органов в определенной последовательности и с определенной длиной хода, фиксируемой контактами командоаппаратов  $SQ1$  и  $SQ2$ .

Схему используют, когда цикл состоит из одного хода «вперед» и одного хода «назад» в исходное положение (рис. 3.7). Схему применяют при автоматической команде, подаваемой реле  $KQ$ . Размыкающие контакты  $KM1$  и  $KM2$  служат для блокировки работы контакторов  $KM1$  и  $KM2$ .

**Схема возвратно-поступательного движения с переменной длиной хода.** На рис. 3.8 приведена схема на четыре различных положения рабочего органа. Контакты  $SQ1...SQ4$  командоаппарата  $SQ$  служат для поочередного отключения механизма в положениях 1—4 хода «вперед», контакт  $SQ5$  в исходном положении. В схеме используются импульсные команды, подаваемые автоматическим реле  $KQ1$ , замкнутым при подаче заготовки, и  $KQ2$ , фиксирующим окончание промежуточной операции в конце каждого хода. Последовательное шунтирование  $SQ1...SQ3$  командоаппарата  $SQ$  производится контактами реле счета числа ходов механизма «назад»  $KC1$ ;  $KC3$ ;  $KC5$ . Реле  $KC7$ , фиксируя четвертый ход «назад», отключает реле  $KC1...KC7$  и запрещает очередное включение «вперед» до поступления сигнала об окончании технологической операции с данной группой заготовок (реле  $KR$ ). Размыкающий контакт реле  $KP$  в цепи катушки  $KC7$  возвращает схему в исходное состояние.

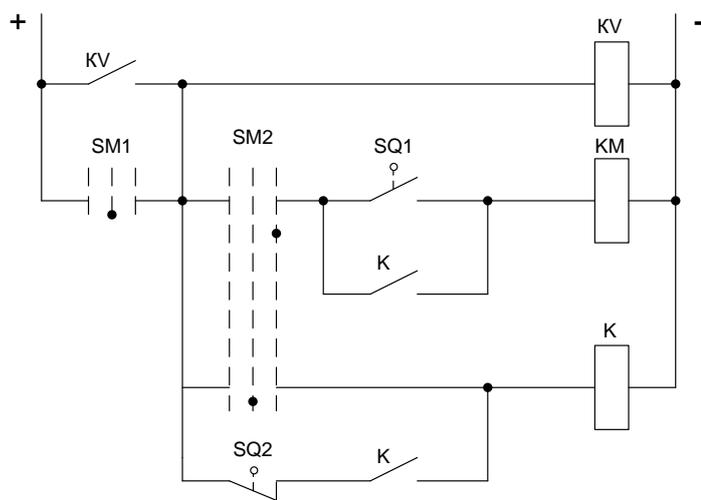


Рис. 3.4. Схема управления шаговым движением механизма



### Схема управления передачи изделий на общий транспортер.

Эта схема управления применяется в тех случаях, когда необходимо производить транспортировку сырья от нескольких станков на один транспортер.

На рис. 3.9, *а* каждый из станков  $C1...C3$  имеет отводящий рольганг, который состоит из секций  $P1 = 1, P2=1$  и т.д. С отводящих рольгангов изделия поступают на общий поперечный цепной транспортер, на приводе которого установлены двигатель  $M$  и командоаппарат  $SQ10$ . Датчики фиксируют  $SQ1; SQ3; SQ5$ — подход изделия к транспортеру;  $SQ2; SQ4; SQ6$  — Поступление изделия к соответствующему упору на транспортере:  $SQ7, SQ8$  — прохождение изделия с транспортера на отводящий рольганг. Общее число датчиков  $3n$ , где  $n$  — число станков. Выдача изделий из любого станка производится на неподвижный транспортер. Узлы схемы управления представлены на рис. 3.9, *б, в, г*. Если сработает любой из датчиков  $SQ2, SQ4, SQ6$ , срабатывает соответствующее реле ( $K1...K3$ ), которое включает реле  $K$ . Срабатывает контактор  $KM$ , подключающий двигатель  $M$  к сети.

Рассмотрим, например, случай выдачи изделия со станка  $C1$ . Контакты реле  $K1$  остаются втянутыми до тех пор, пока изделие, перемещаемое по транспортеру, не войдет в зону станка  $C2$  между датчиками  $SQ7$  и  $SQ8$ , что фиксирует реле  $K2$ . С выдержкой времени реле  $KT$  реле  $K1$  приходит в исходное положение, однако реле  $K$  остается включенным. Когда изделие входит в зону станка —  $C3$ , срабатывает реле  $K3$ , которое через реле времени  $KT2$  отключает  $K2$ . Таким образом, реле  $K1...K3$  запоминают поступление изделий на транспортер и следят за их движением. Когда изделие будет выдано на отводящий рольганг, датчик  $SQ9$  отключит реле  $K3$  и реле  $K$  переходит в исходное состояние, а транспортер продолжает движение, пока его захваты не придут в исходное положение, которое фиксируется командоаппаратом  $SQ10$ . При этом контакт  $SQ 10.1$  командоаппарата размыкается и контактор  $KM$  отключается.

Если во время перемещения изделия, выданного из станка  $C1$ , другое изделие поступает к датчику  $SQ3$  со станка  $C2$ , а первое изделие еще не вошло в зону станка  $C2$  (т. е. не подошло к датчику  $SQ7$  и реле  $K2$  не сработало), то реле  $K4$  остановки транспортера через реле  $KT3$  отключает реле  $K$ . Транспортер останавливается.

Таким образом принимается второе изделие на транспортер, при этом срабатывает датчик  $SQ4$  и реле  $K2$ . Далее срабатывает реле  $K4$ , вновь срабатывают  $K$  и  $KM$  и транспортер опять приходит в движение.

Если же изделие со станка  $C2$  поступило к датчику  $SQ3$  в тот момент, когда первое изделие уже прошло мимо датчика  $SQ7$  (сработало реле  $K2$ ), то транспортер не остановится до тех пор, пока это изделие не дойдет до  $SQ8$  в конце зоны станка  $C2$ . Лишь тогда при срабатывании  $K3$  и возврата  $K2$  реле  $K4$  приходит в исходное состояние и транспортер останавливается для приема изделия от станка  $C2$ . Таким образом производится прием изделия и от станка  $C2$ . Таким образом, если изделие находится в зоне какого-либо станка (между соседними датчиками на транспортере по ходу движения), то прием изделия с данного станка не производится, пока предыдущие изделия не выйдут из этой зоны.

Реле  $K6$  в цепи контактора  $KM$  фиксирует уход изделия с отводящего рольганга за транспортером, после чего дается разрешение на передачу очередного изделия с транспортера. Реле  $K5$  исключает эту блокировку в начале работы и вводит ее, когда первое изделие поступает к датчику  $SQ9$ . На схеме показаны цепи контакторов  $KM1$  и  $KM2$ , включающих соответственно двигатели секций рольганга  $P1-1$  и  $P2-1$ . Контактор  $KM1$  срабатывает при срабатывании контактора  $KM3$  рольганга станка  $C1$ . Если транспортер неподвижен, его захваты не находятся на оси рольганга (это фиксируется реле  $K7$ ), одновременно с контактором  $KM1$  срабатывает и  $KM2$  и изделие подается к датчику  $SQ2$  перед упором. При этом обе секции транспортера останавливаются. Если же во время включения секции  $P1-1$  транспортер производит перемещение изделия, выданного с других станков, то реле  $K7$  отключено, и при подходе изделия к датчику  $SQ1$  секция  $P1-2$  отключается. Когда транспортер остановится, секции  $P1-1$  и  $P2-1$  включаются и изделие выдается на транспортер. Управление секциями других станков производится аналогично.

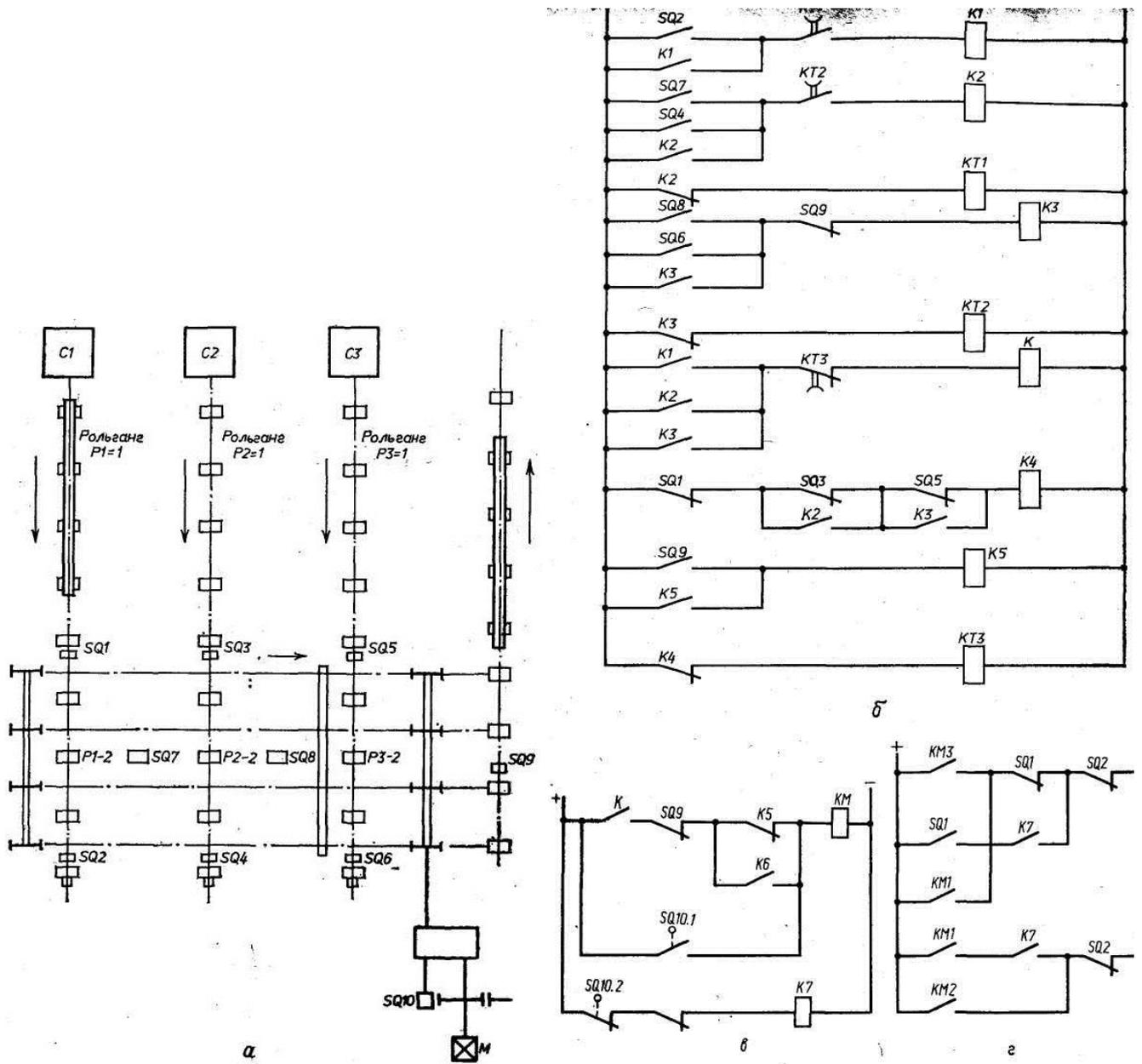


Рис. 3.9. Автоматическая передача изделий на один общий транспортер

*Транспортер подачи твердого топлива в котел.*

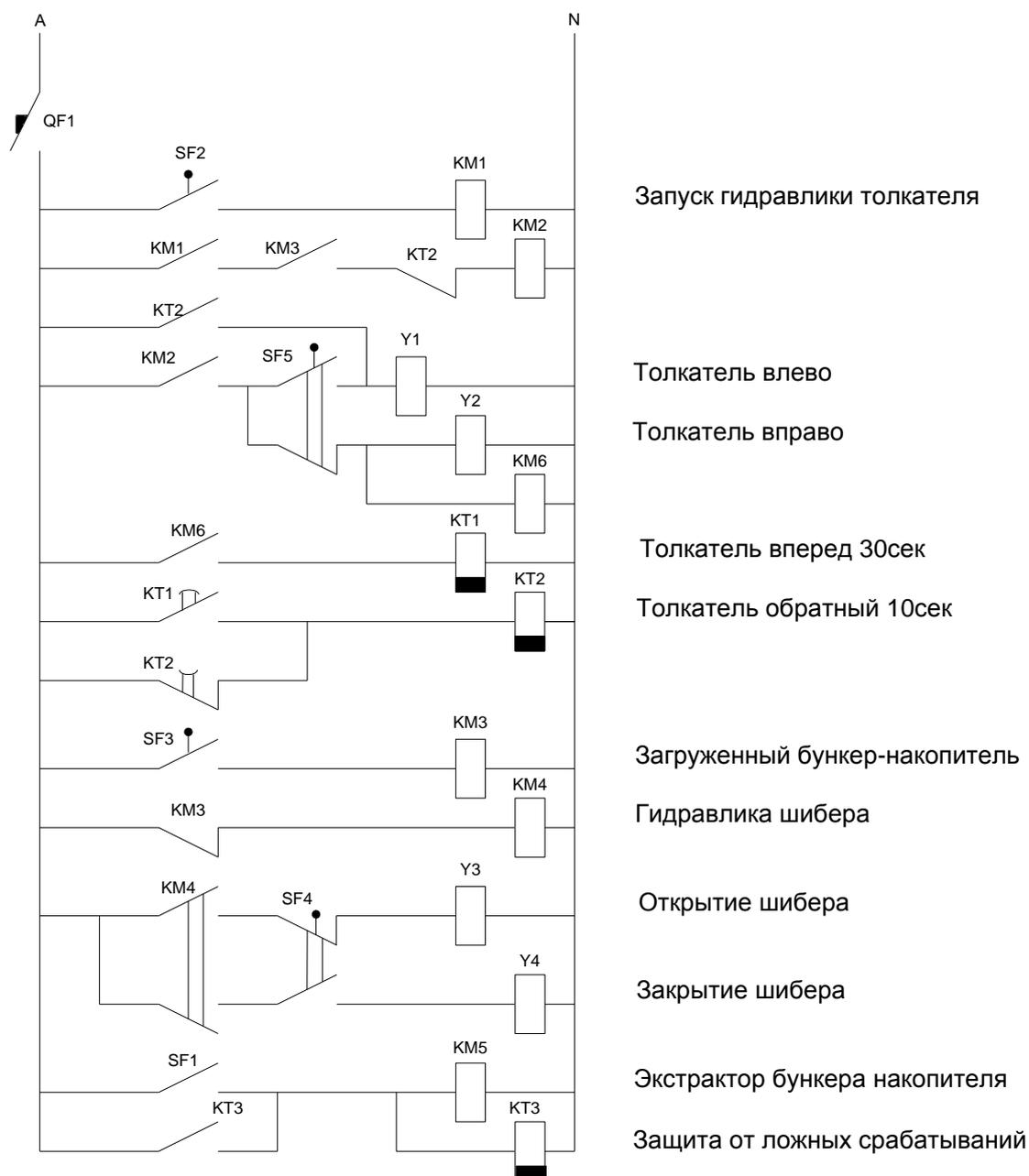


Рис. 3.10. Автоматическая подача твердого топлива в котел.

Условные обозначения:

Y1 - эл. клапан гидравлический на отвод толкателя в положение 1 (открыто). Y2 - эл. клапан гидравлический на отвод толкателя в положение 2 (закрыто). Y3 - эл. клапан гидравлический на открытие шибера Y4 - эл. клапан гидравлический на закрытие шибера.

KM1 - пускатель запуска гидравлики толкателя. KM2 - промежуточное реле. KM3 - промежуточное реле. KM4 - пускатель привода гидравлик шибера, привода транспортера подачи топлива. KM5 - пускатель привода экстрактора бункера накопителя.

KT1 - реле времени хода толкателя 30 секунд. KT2 - реле времени обратного хода толкателя 10 секунд. KT3 - реле времени выдержки от ложного срабатывания фото датчика 10 секунд.

SF2 - фотодатчик загрузки топки котла. SF3 - емкостной датчик загрузки бункера-накопителя толкателя.

SF4 - путевой выключатель шибера. SF5 - путевой выключатель толкателя.

QF1 - автоматический выключатель (защита цепи управления.)

## Тема 4. Типовые схемы подъемно-транспортными устройствами

### Общие сведения

ПТМ общепромышленного назначения по принципу действия разделяются на:

- машины прерывистого действия (время действия чередуется с паузой)
- краны, подъемники-лифты (например, лебедки)
- машины непрерывного действия (различного типа конвейеры)

#### I ПТМ прерывистого действия

Требования к САУ:

- обеспечение минимального времени нахождения груза в пути (минимальное время разгона и замедления двигателей, максимальная допустимая величина ускорения);
- обеспечение точности остановки грузозахватывающего устройства;
- обеспечение остановки привода в конечных положениях;
- наличие тормозов закрытого типа, действующих при снятии напряжения;
- обеспечение защиты от самозапуска двигателей при подаче напряжения после перерыва электроснабжения;
- удобство управления механизмом и его обслуживание

#### Общие сведения о подъемных кранах

Эл. подъемные краны – это устройства, служащие для вертикального и горизонтального перемещения грузов. Основными элементами мостового подъемного крана являются:

- подвижная металлическая конструкция (ферма),
- подъемная лебедка на специальной тележке (расположенной на ферме),
- кабина управления краном.

Мостовые краны могут снабжаться

- крюковыми захватами (крюковые краны),
- грейферными захватами (грейферные краны)
- подъемными магнитами (магнитные краны).

Несмотря на многообразие подъемных кранов, все они снабжаются типовым оборудованием, выбор которого определяется условиями работы и характером нагрузки.

Механизм передвижения формы крана и подъемной лебедки приводятся в действие эл. двигателями.

Управление двигателями производится контроллерами, которые находятся в кабине управления.

Эл. соединение подъемного двигателя и двигателя перемещения тележки с аппаратурой управления может осуществляться вспомогательными троллеями, по которым скользят подвижные токосъемники, или при помощи специального гибкого кабеля.

Питание к электрооборудованию крана подводится от линии через троллеи, уложенные вдоль подкрановых путей.

Большинство кранов оборудуются двигателями постоянного или переменного тока с реостатным регулированием скорости и момента.

Специальные краны, от которых требуется особенно точная работа, снабжаются системами электропривода с регулируемым источником питания двигателей.

При реостатном регулировании используют типовые схемы с силовыми или магнитными контроллерами. Тип контроллера определяется мощностью управляемого двигателя и режимом работы.

Так при легком режиме работы, как правило, применяются силовые контроллеры, при весьма тяжелом – только магнитные.

Аппаратура защиты располагается на защитных панелях.

Схемы с контроллерным управлением двигателями крана в зависимости от характера нагрузки могут быть симметричными и несимметричными. В механизмах передвижения и поворота, момент сопротивления которых не зависит от направления движения, применяют контроллеры (командоконтроллеры) с симметричной диаграммой замыкания контактов. Двигатели в таких схемах работают при движении вперед и назад на одинаковых характеристиках.

При работе двигателей подъемных механизмов с несимметричной нагрузкой в режиме подъема используют механические характеристики, отличные от характеристик в режиме спуска. Поэтому в схемах управления подъемными двигателями применяют контроллеры с несимметричной диаграммой замыкания контактов.

#### Схемы управления с силовыми контроллерами.

Примером симметричной схемы контроллерного управления асинхронным двигателем с фазным ротором может служить схема электропривода механизма передвижения с контроллером ККТ-61, приведенная на рис.4.1. Направление вращения двигателя определяется положением рукоятки контроллера относительно его нулевой отметки. При этом меняется лишь чередование фаз питающего двигатель напряжения. Последовательность замыкания контактов, шунтирующих секции резисторов роторной цепи, остается прежней.

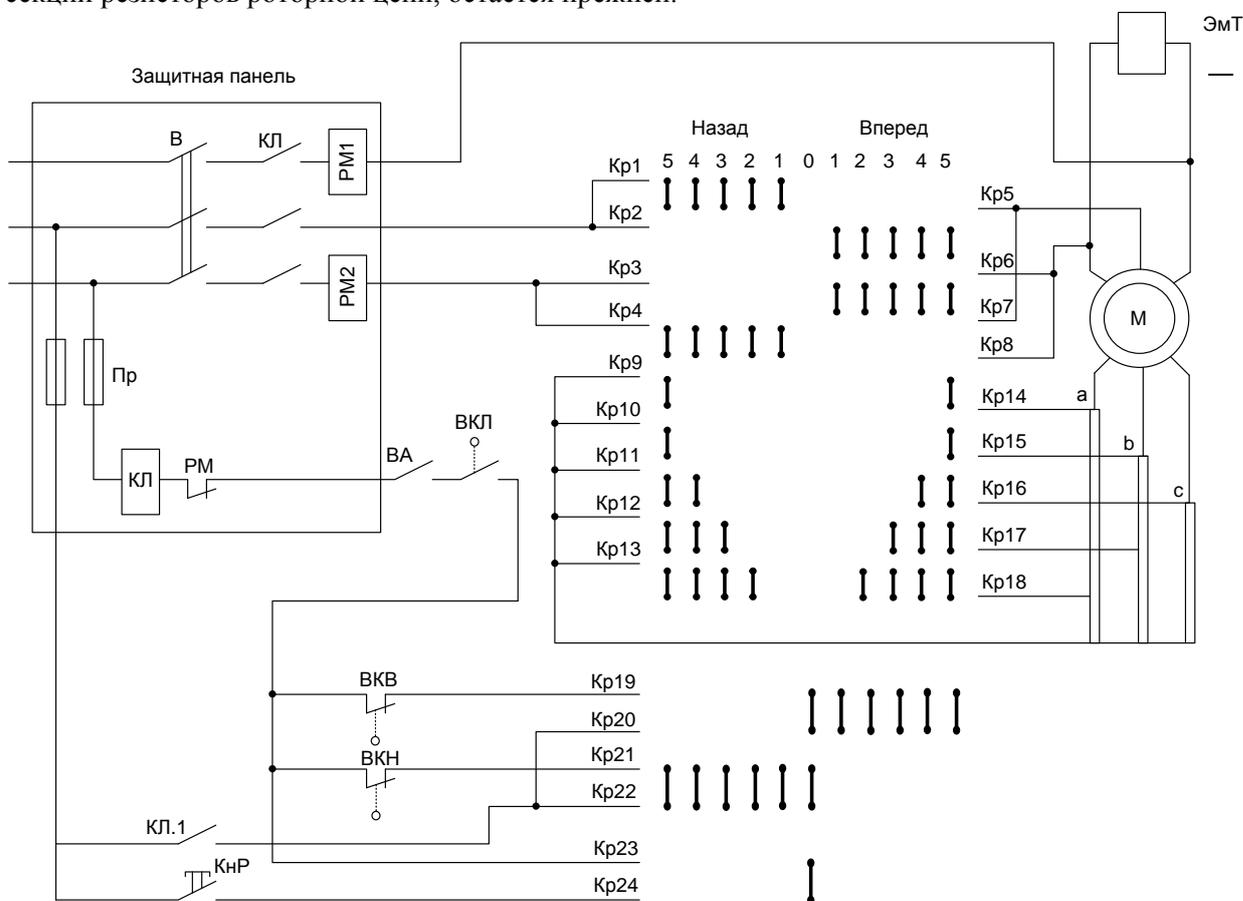


Рис. 4.1. Схема управления крановым двигателем с контроллером ККТ-61

Для сокращения числа контактов контроллера при требуемом количестве пусковых ступеней применяют несимметричное включение роторных резисторов. Допустимая величина искажения механических характеристик двигателя определяет допустимую разницу в величинах сопротивлений по фазам двигателя. При выборе резисторов должно соблюдаться соотношение

$$R_a/R_b = R_b/R_c = \lambda,$$

где  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  – сопротивления линий ротора;  $\lambda$  – отношение величин фазовых сопротивлений.

Работа двигателя с недопустимой перегрузкой и к.з. исключается максимальной защитой, состоящей из блок-реле, катушки которых  $PM1$  и  $PM2$  включены в цепь статора (см. рис. 3.12). При срабатывании блок-реле воздействует на общий для всех катушек контакт  $PM$ , который отключает линейный контактор  $КЛ$ .

В схеме управления предусмотрена нулевая защита, которая достигается последовательным включением контактов  $Кр23$ ,  $Кр24$  контроллера в цепь катушки  $КЛ$ . Если при исчезновении напряжения контроллер находится не в нулевом положении, эта защита предотвращает самопроизвольный пуск двигателя при восстановлении напряжения. Линейный контактор  $КЛ$  может быть включен кнопкой начала работы  $КнР$  при замкнутых контактах  $Кр23$ ,  $Кр24$ ,  $PM$ , выключателя люка кабины  $ВКЛ$  и включенном аварийном выключателе  $ВА$ . После

включения линейного контактора и переводе контроллера из нулевого положения катушка КЛ получает питание через контакты конечных выключателей, ограничивающих перемещение механизма вперед – ВКВ или назад – ВКН. Если механизм оказывается за пределами рабочей зоны, то размыкается один из выключателей ВКВ или ВКН и отключается линейный контактор. Направление возможного передвижения крана в сторону рабочей зоны при повторном пуске двигателя определяется замкнутым состоянием контактов ВКВ, Кр19, Кр20 или ВКН, Кр21, Кр22.

В первом положении контроллера и замкнутых контактах линейного контактора КЛ и включенном рубильнике В к цепи статора двигателя через реверсирующие контакты Кр2, Крб и Кр3, Кр7 или Кр1, Кр5 и Кр4, Кр8 подведено напряжение сети, а в цепь ротора полностью введено сопротивление регулировочного резистора. Одновременно с двигателем получает питание электромагнит тормоза ЭТ, освобождающий тормозной шкив механизма. Поворот рукоятки контроллера в последующие положения приводит к поочередному замыканию контактов Кр9-Кр18, шунтирующих секции роторных резисторов.

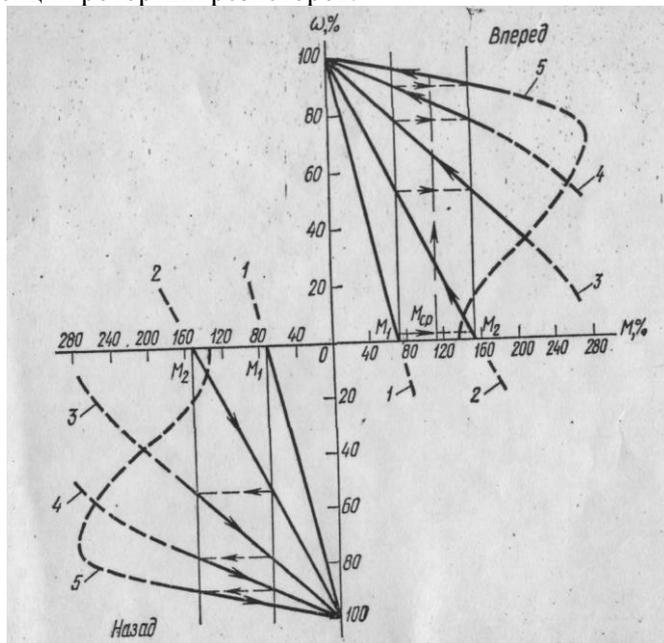


Рис. 4.2. Механические характеристики асинхронного двигателя, управляемого силовым контроллером ККТ-61

На рис. 4.2 приведены механические характеристики двигателя, номер каждой характеристики соответствует положению контроллера. Характеристика 1 с малым значением пускового механизма – вспомогательная, исключающая удары при выборе зазоров в кинематической цепи. Промежуточные характеристики 2, 3 и 4 служат для ограничения ускорения и тока при пуске двигателя. Для плавного пуска двигателя необходимо переключение контроллера из одного положения в другое производить с интервалом времени, в течение которого момент двигателя достигает значения момента переключения  $M_1$ . При таком пуске величина среднего ускорения будет:

$$\frac{d\varpi}{dt} = \frac{1}{J} (M_{cp} - M_c)$$

где  $M_{cp} = (M_1 + M_2)/2$  – средний момент двигателя;  $M_1$  и  $M_2$  – минимальный и максимальный переключающие моменты двигателя.

Максимальное отклонение ускорения на ступени может достигать значения:

$$\Delta \frac{d\varpi}{dt} = \frac{1}{J} (M_2 - M_1)$$

Механические характеристики 1, 2, 3, 4 используются также для получения пониженной скорости движения механизма.

#### Система управления магнитного контроллера ТСА.

Схема магнитного контроллера типа ТСА обеспечивает автоматический пуск, реверсирование и торможение двигателя, а также концевую защиту. Аппараты нулевой и максимальной защиты вынесены на защитную панель. Автоматический пуск и регулирование скорости достигается изменением величины сопротивления резистора, вводимого в цепь ротора



- типа Т и К – для управления асинхронным двигателем с конт.кольцами (Т – от сети переменного тока, К – постоянного тока);

- типа П – для управления двигателем постоянного тока.

Схема магнитного контроллера ТСА обеспечивает автоматический пуск, реверсирование и торможение двигателя, а также концевую защиту.

Пуск и регулирование скорости достигается изменением величины сопротивления резисторов в цепи ротора и изменением схемы включения статорной цепи.

Элементы системы (рис.4.3)

1. КЛ – линейный контактор
2. КВ, КН – контакторы включения вперед (В) и назад (Н)
3. КТ – контактор тормоза
4. КП – контактор противовключения
5. КО – контактор режима однофазного питания статора
6. РБ – реле блокировочное (с выдержкой времени)
7. НП – ножная педаль
8. КУ1 – КУ4 – контакторы ускорения
9. РУ – реле ускорения.

При подъеме груза в первом положении рукоятки К.К. включаются КВ, КЛ, КТ, с выдержкой времени РБ и КП. Двигатель подключается к сети и включается электромагнит тормоза. Из цепи ротора выводится ступень резистора противовключения. Подготавливается цепь для включения контакторов ускорения КУ1-КУ4.

Первому положению рукоятки К.К. соответствует характеристика 1 с пусковым моментом ~70%Мн. При работе двигателя на этой характеристике производится выбор слабины подъемных канатов и подъем малых грузов с нужной скоростью.

При передвижении рукоятки К.К. во второе положение включается КУ1, контакты которого шунтируют части резистора в цепи ротора. Характеристика 2 становится более жесткой и проходит через точку с пусковым моментом равным 140% Мном. При этом можно поднимать на малой скорости груз, по величине близкий к номинальному.

Подъем больших грузов на пониженной скорости производится на третьем положении рукоятки К.К. четвертое положение рукоятки К.К. служит для подъема грузов с номинальной скоростью.

Схемой предусмотрен автоматический пуск до основной скорости подъема при перестановке рукоятки К.К. из нулевого положения в четверток, минуя промежуточные.

Для остановки груза рукоятка К.К. переводится в нулевое положение.

Чтобы не допустить свободного падения груза, вначале отключается контактор тормоза КТ – происходит механическое торможение, а затем через промежуток времени (контактом РБ) отключаются контакторы КВ и КЛ.

Последовательность работы аппаратов схемы управления при подъеме груза:

А) Первое положение рукоятки К.К.

+ КВ → +КЛ → +КТ → ↑ +ЭМТ  
+ РY1  
+ РY2                      + РБ → +КП → ↑  $r_{узм}$   $r_{np}$

Б) Второе положение К.К.

+ КУ1 → + $r_1$

В) Третье положение К.К.

+ КУ2 → + $r_2$

↓  
- РY1 → ( $\Delta t$ )

Г) Четвертое положение

+ КУ3 → + $r_3$

↓  
- РY2 → ( $\Delta t$ ) → +КУ4 → + $r_4$

При опускании груза схема магнитного контроллера допускает два режима работы:

- спуск тяжелого груза,

- спуск легкого груза.

Режим работы задается оператором при помощи ножного переключателя НП, расположенного в кабине крана.

Опускается тяжелый груз при нажатой педали, замыкающий контакт которой в первом положении рукоятки К.К. обеспечивает включение контакторов КВ, КЛ, КТ и КП. Двигатель работает в режиме противовключения на характеристике С1 с выведенной из цепи ротора ступенью резистора противовключения.

Для увеличения скорости опускания груза рукоятку К.К. переводят во второе положение. Вводится ступень противовключения (за характеристика С2).

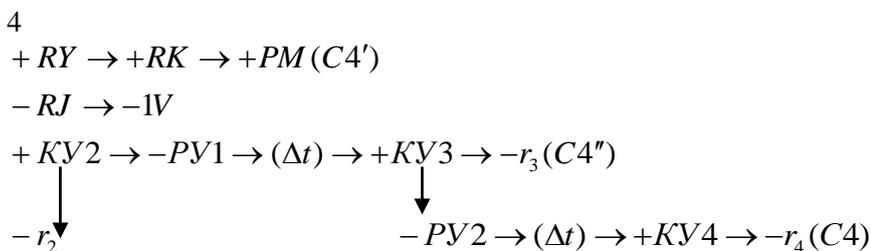
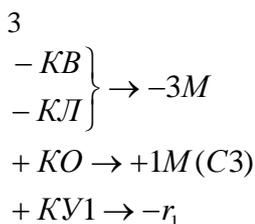
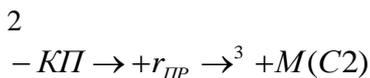
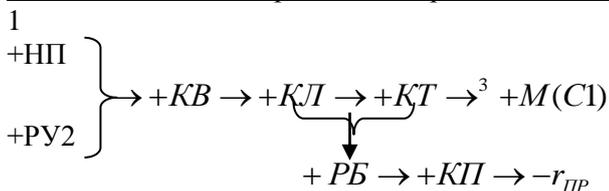
Дальнейшее увеличение скорости опускания при третьем положении рукоятки К.К. достигается однофазным включением двигателя с включенными контакторами Ко и КУ1 (характеристика С3).

В четвертом положении рукоятки К.К. теряет питание КО и включ.КН и КУ2. С выдержкой времени реле РУ1 и РУ2 включают контакторы КУ3 и КУ4. Двигатель из режима однофазного питания переходит в двигательный и по характеристикам С4', С4'' и С4 разгоняется до основной скорости опускания.

Перестановка рукоятки К.К. из четвертого положения в третье при спуске приводит к снижению скорости опускания груза. Двигатель, минуя режимы, соотв. С4' и С4'' переходит на характеристику С3 однофазного включения. Дальнейшее снижение скорости опускания груза достигается перемещением рукоятки К.К. во второе (С2), а затем первое положение.

В нулевом положении К.К. на шкив накладываются колодки механического тормоза и одновременно происходит эл.торможение в режиме противовключения.

Последовательности работы аппаратов схемы при опускании тяжелого груза:



Спуск легкого груза  $M_c < 70\% M_n$  осуществляется при отпущенной педали НП. Разомкнутые контакты НП в цепи катушки контактора КВ исключают работу двигателя на характеристиках С1 и С2, на которых возможен подъем малого груза при первом и втором положении К.К. В третьем и четвертом положениях К.К. на спуск аппараты съемы работают в той же последовательности, что и при спуске тяжелого груза.

Посадочные скорости при спуске малого груза достигается попеременно-возвратным переводом рукоятки К.К. из четвертого или третьего во второе или первое положение на спуск. При этом двигатель попеременно будет работать в режиме силового спуска (четвертое полож. К.К.) и в режиме противовеса (первое положение К.К.)

При резком перемещении рукоятки К.К. из четвертого положения на спуск в нулевое одновременно с действием механического тормоза подъемная лебедка тормозится двигателем, который работает в режиме противовключения.

Последовательности работы аппаратов схемы при опускании легкого груза:

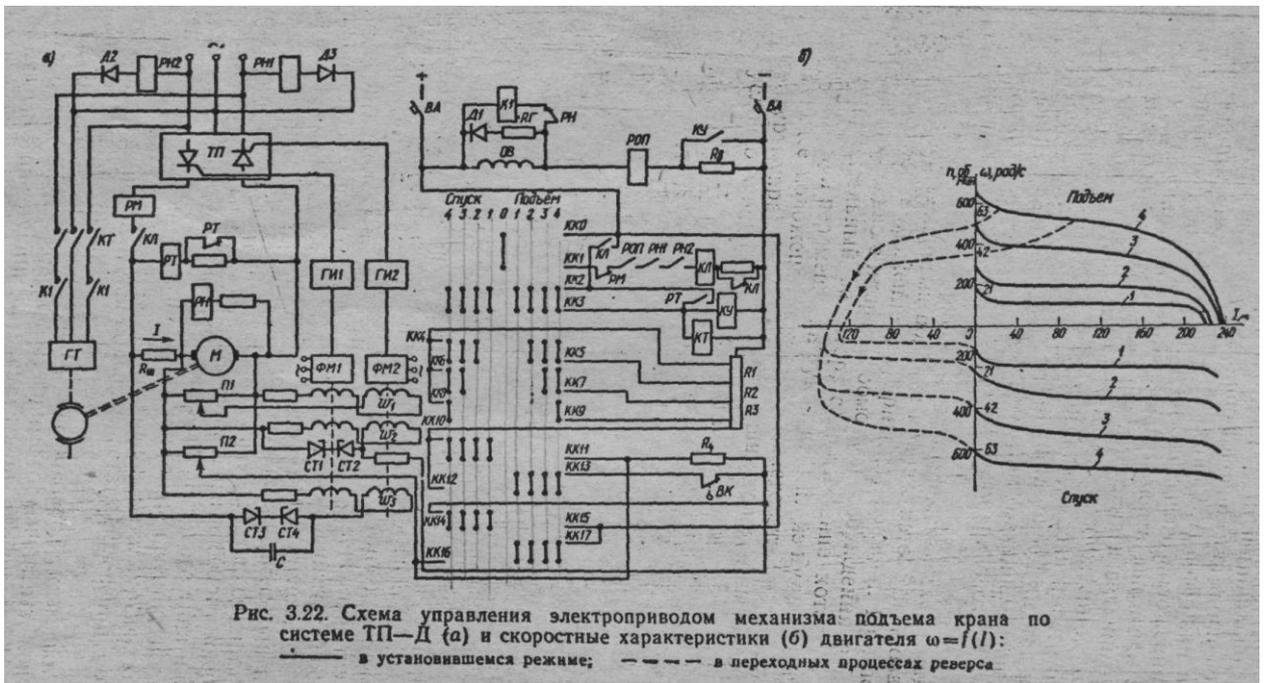
- 1  
+PУ1  
+PУ2
- 2
- 3  
+PБ → +KТ → +3MТ  
+KО → +1M(C3)  
+KУ1 → -(r<sub>1</sub> + r<sub>ПР</sub>)
- 4  
-KО  
+KН → +KЛ → +3M(C4')  
+KУ2 → -r<sub>2</sub>  
-PУ1 → (Δt) → +KУ4(C)

В магнитных контроллерах типа ТСА основными рабочими положениями рукоятки К.К. являются четвертое положение подъема и спуска.

Все промежуточные положения предназначаются для плавного пуска двигателя и получения низких посадочных скоростей. Пускорегулировочные резисторы в цепи ротора рассчитаны на кратковременную работу. Поэтому не допускается продолжительная работа двигателя на промежуточных характеристиках.

**Схема управления электроприводом с тиристорным преобразователем и эл.двиг. постоянного тока.**

Являясь бесконтактным этот метод обладает высокими регулировочными и энергетическими показателями. Плавные переходные процессы, отсутствие контактной аппаратуры повышает срок службы электрич. и механич. оборудования подъемных кранов, снижает брак продукции, который может возникнуть при транспортировке.



Управление осуществляется при помощи К.К. имеющего по четыре положения рукоятки на подъем и спуск. Скоростные характеристики приведены на том же рис. и соответствуют четырем положениям рукоятки.

Формирование статич. и динамич. характеристик осуществляется путем введения в цепь управления фазосдвигающих мостов ФМ1 и ФМ2 обратных связей по току и напряжению двигателя.

Отрицательная обратная связь по току с отсечкой (W3) – служит для ограничения тока в якорной цепи при недопустимой статической нагрузке. Отсечка по току наступает, когда падение напряжения  $I R_{ш}$  становится равным напряжению стабилизации  $V_{ст3,4}$  стабилитронов СТ3 и СТ4, последовательно включенных с обмотками W3.

Отрицательная связь по напряжению выполнена с отсечкой и служит для повышения жесткости механических характеристик двигателя в области номинальной нагрузки. Сигнал снимается с потенциометра П2, электрически суммируется с задающим напряжением  $V_{R4}$ , величина которого определяется положением рукоятки КК, и подводится к обмотке W2. Действие отрицательной связи по напряжению проявляется, когда

$$V_{R4} - \alpha_2 V_D \leq V_{ст1,2}$$

Положительная связь по напряжению позволяет формировать крутопадающую часть мех. характеристики в области стопорного тока. Обмотка W1 положительной обратной связи по напряжению включена на напряжение двигателя через потенциометр П1.

## Тема 5. Типовые схемы управления подъемниками (лифтами)

Подъемники прерывистого действия применяют при транспортировании грузов или людей с одного уровня на другой в специальных грузонесущих устройствах:

- ✓ Пассажирские и грузовые лифты
- ✓ Шахтные подъемные машины
- ✓ Фуникулёры

Подъемники прерывистого действия классифицируются по ряду признаков:

- ✓ По характеру перемещаемых грузов:
  - Грузовые
  - Грузопассажирские
  - Пассажирские
- ✓ По виду движения грузонесущего приспособления:
  - Вертикальные
  - Наклонные
- ✓ По типу грузонесущего приспособления
  - Плетневые
  - Скиповые
  - С подъемной кабиной
  - Другие

Каждой группе подъемников присущи свои особенности. Однако общим является наличие направляющих, в которых без раскачивания перемещается грузонесущее приспособление.

В подавляющем большинстве подъемников с электрическим приводом движение грузонесущему устройству сообщается от редукторной лебедки с канатоведущим шкивом, а в установках с высокой скоростью движения грузонесущего приспособления – от безредукторной лебедки.

Наиболее распространенные механизмы вертикального транспорта – пассажирские лифты. К их электроприводу предъявляются наиболее жесткие требования в отношении регулировочных свойств и высокой степени автоматизма схемы управления.

Системы электропривода лифта и схема управления им в значительной степени определяется скоростью движения кабины. Условно лифты подразделяются на три группы:

- тихоходные со скоростью движения кабины до 0,5 м/с,
- быстроходные – до 1,0 м/с,
- скоростные – свыше 1,0 м/с.

Скорость движения кабины грузовых лифтов составляет 0,1-0,5 м/с.

Величина предельного ускорения и замедления для тихоходных и быстроходных лифтов составляет 1,5 м/с<sup>2</sup>, для скоростных – 2,5 м/с<sup>2</sup>.

Производная ускорения по времени (рывок) не должны превышать 3,0 – 10,0 м/с<sup>3</sup>.

По грузоподъемности пассажирские лифты могут быть выполнены на 250-1500кГ (от 3 до 21 человека). Грузовые лифты изготавливают на грузоподъемность от 50 до 5000кГ.

Электропривод пассажирских и грузовых свободно загружаемых лифтов должен обеспечить остановку кабины с отклонением уровней пола кабины и этажа, не превышающим ± 35-50 мм, а грузопассажирских и грузовых с грузами на тележках – ±10-15 мм.

Рабочая зона передвижения кабины ограничена конечными выключателями, установленными в шахте.

При аварийном превышении кабиной установленной скорости происходит автоматическое отключение двигателя и одновременно приходит в действие эл.тормоз.

Пассажирские и грузовые лифты с относительно низкой скоростью движения кабины (до 0,5 м/с) оборудуются чаще всего электроприводом переменного тока с асинхронным к.з.двигателем или двигателем с фазным ротором.

Двигатель с фазным ротором устанавливается в тех лифтах, в которых к.з.двигатель не может быть использован по условию нагрева в переходных процессах разгона и торможения кабины или при ограничении мощности питающей линии.

При скорости движения кабины лифта 0,65-1 м/с с целью повышения точности остановки применяют асинхронные двухскоростные двигатели, обеспечивающие перед остановкой кабины пониженную скорость движения.

В лифтах, кабина которых движется со скоростью более 1,5 м/с широкое распространение получили электроприводы постоянного тока по системе Г-Д и тиристорные преобразователи.

## Схема управления лифтом со скоростью движения кабины до 0,5м/с

Основные обозначения:

КВ, КН – контакторы пуска «вверх» и «вниз» соответственно

Эмт – электромагнитный тормоз

Ш – тормозной шкив

КУ1 ÷ КУ3 - контакторы ускорения

КнП1 ÷ КнП4 – кнопки «Приказа» (находятся на пульте в кабине)

КнВ1 ÷ КнВ4 – кнопки «Вызова» (на соответствующих этажах)

ПЭ1 ÷ ПЭ4 – путевые перекидного типа этажные переключатели ( в шахте против соответствующих их номеру)

Если кабина находится на 3-ем этаже, то ПЭ3 находится в среднем нейтральном положении. Контакты переключателей нижних этажей при этом замыкают верхний контакт, а верхних этажей – нижний контакт.

РЭ1÷РЭ4 – этажные реле ( на панели управления, включенные при закрытых дверях кабины и шахты соответствующего этажа);

ВКДК – выкл. конечный дверей кабины;

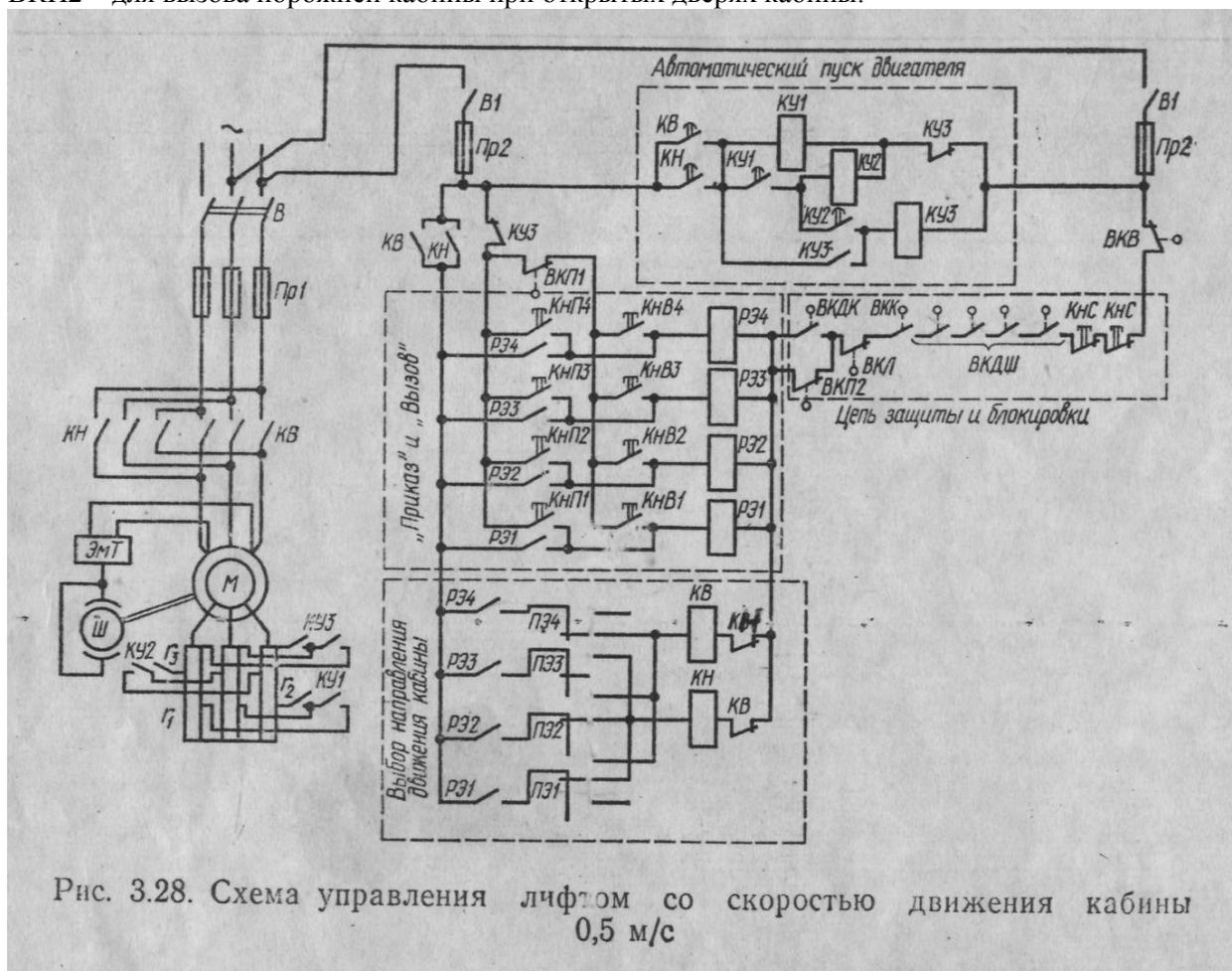
ВКДШ – выкл. конечный дверей шахты;

ВКК – контакты контроля натяжения канатов (в нормальном состоянии контакт замкнут);

ВКЛ – контакты ловителя (в нормальном состоянии контакт замкнут);

ВКП1 – выкл. конечный пола (замкнут при отсутствии пассажира в кабине);

ВКП2 – для вызова порожней кабины при открытых дверях кабины.



Узел схемы, определяющий выбор направления движения кабины, состоит из путевых перекидного типа этажных переключателей ПЭ1-ПЭ4, контакторов КВ и КН. Этажные переключатели установлены в шахте лифта против соответствующих их номеру этажей. Положение перекидного контакта этажного переключателя зависит от места нахождения кабины. Если, например, кабина находится против третьего этажа, перекидной контакт ПЭ3 под действием

упора кабины приходит в среднее нейтральное положение. Контакты этажных переключателей нижних этажей при этом замыкают верхний контакт, подготавливая цепь включения катушки контактора КН, а контакты этажных переключателей верхних этажей замыкают нижний контакт, соединенный с катушкой контактора КВ.

Рассмотрим работу схемы управления на примере движения кабины с третьего этажа на первый. Команда на движение кабины дана пассажиром, находящимся в кабине (нажата кнопка КнП1). Этажное реле РЭ2 будет включено только при закрытых дверях кабины и шахты (замкнуты контакты ВКДК и ВКДШ) при замкнутых контактах ВКК, контролирующих натяжение канатов, и контактах ловителя ВКЛ. При включенном реле РЭ1 катушка контактора КН получает питание через замкнутый блок-контакт КУЗ, контакты КнП1, замкнувшиеся контакты РЭ1 и контакты этажного переключателя ПЭ1. После включения контактора КН кнопка КнП1 может быть отпущена, так как РЭ1 и КН подключаются к сети через контакты этажного реле и блок-контакт КН, минуя цепь кнопки.

Включенный контактор КН подводит напряжение к двигателю. Разбег двигателя в соответствии с реостатными характеристиками обеспечивается узлом автоматического пуска в функции независимой выдержки времени. Выдержки времени, необходимые для разбега двигателя по ступеням, создаются встроенными в контакторы КВ, КН, КУ1, КУ2 реле времени. Первая ступень резистора выводится контактами контактора КУ1, в цепи катушки которого по истечении времени разбега двигателя на первой ступени замыкается контакт УН. Контактные пары последующих ступеней выводят резистор из цепи ротора после замыкания соответствующих блок-контактов в цепи их катушек. Контактор КУЗ, включаясь, выводит последнюю ступень резистора и одновременно размыкающимся блок-контактом отключает контакторы КУ1 и КУ2. Размыкающийся блок-контакт КУЗ в цепи кнопок управления исключает влияние контактов кнопок КнВ и КнП во время движения кабины и, кроме того, предотвращает прямой пуск двигателя в случае неисправности контактора последней ступени ускорения.

Кабина лифта остановится, когда она дойдет до первого этажа и упором воздействует на этажный переключатель, контракт которого займет нейтральное положение. Контактор КН и реле РЭ1 при этом отключатся от сети. Одновременно потеряют питание двигатель и электромагнит тормоза.

Последовательность работы аппаратуры управления при воздействии на вызывную кнопку КнВ аналогична рассмотренной с той лишь разницей, что кабину можно вызвать на любой этаж, если она не занята. В этом случае замкнут контакт пола кабины ВКП1 в цепи кнопок вызова. При движении кабины лифта по вызову двери кабины могут оставаться открытыми, так как при порожней кабине контакты дверей кабины ВКДК шунтируются размыкающимися контактами ВКП2.

Если скорость движения кабины (противовеса) вниз превысит номинальную скорость не менее чем на 15% и не более чем: на 40% — для лифтов с номинальной скоростью до 1,4 м/с; на 33% — для лифтов с номинальной скоростью более 1,4—4 м/с; на 25% — для лифтов с номинальной скоростью более 4 м/с, то посредством зажима и каната механизм ограничителя скорости, вращаясь быстрее, заставляет срабатывать устройство, зажимающее канат ограничителя скорости.

### **Схема управления лифтом со скоростью движения кабины до 0,65м/с.**

Типовая схема управления пассажирским лифтом на двенадцать этажей, в котором для получения необходимой точности остановки кабины используется двухскоростной двигатель, приведена на рис.3.29.

Элементы схемы:

КБ – контактор высокой скорости (отключается при приближении к остановке 600-900мм)

КМ – контактор остановочной скорости (включается при приближении к остановке)

РФ – реле форсировки

РЭ – резистор для форсировки

ДТО – датчик точной остановки (магнитопровод датчика замыкается шунтом, находящимся в шахте на уровне, соответствующем точной остановке).

РТО – реле точной остановки

МГ – двигатель дверей

КДО – контактор открывания дверей

КДЗ – контактор закрывания дверей

П – переключатель режима  
ВКП1 – контактор пола (замкнут при отсутствии пассажира)  
ВКП2 – контактор пола (замыкается при пассажире)  
ВКДШ – контакты замков шахты  
ВКДК – контакты дверей кабины  
КнС – кнопка стопа  
ВКВ – конечное выключение переподъема  
ВКП – конечное выключение приемка  
ВКЛ – конечное выключение ловителем  
ВКС – конечное выключение слабины каната  
ВКЗ – конечное выключение закрывания дверей  
РДК – реле контроля дверей (замкнут при закр.двери)  
РВ – реле времени  
ПЭ – путевые этажные выключатели  
РД – реле движения кабины  
РПК – реле контроля пола (получает питание при отсутствии пассажира)  
ВКО – конечное выключение открывания дверей (размыкается при полностью открытой двери)

В качестве привода используется двухскоростной двигатель.

Изменение скорости двигателя осуществляется переключением обмоток статора (изменением числа пар полюсов).

Схема предусматривает следующие режимы работы:

- нормальный – кабина лифта движется по приказам и вызовам пассажиров;
- режим ревизии – кабина движется вверх и вниз на малой скорости при включении кнопок, находящихся на крышке кабины;
- режим управления из машинного помещения – движение кабины происходит с большой скоростью при ручном воздействии на этажные реле.

Для изменения режима работы служат:

- переключатель режима – П,
- штепсельные разъемы ШР1 и ШР2.

С целью повышения надежности работы тормозного устройства применен электромагнитный ЭМТ на постоянном токе. Для сокращения времени срабатывания в цепь катушки электромагнита введен резистор РЭ, шунтируемый размыкающимся контактом реле форсировки РФ.

При приближении кабины к этажной площадке против которой предполагается остановка (600-900мм от уровня этой площадки) отключается контактор остановочной скорости КБ и включается контактор остановочной скорости КМ.

Переход двигателя на характеристику с пониженной скоростью (точка б, рис. 3.29 г) сопровождается эл. торможением. Затем на малой скорости кабина дотягивается до уровня точной остановки. Останавливается кабина механическим тормозом при отключении от сети двигателя и электромагнита ЭМТ.

Схема содержит специальный узел изменения скорости движения. Он включает контакторы КБ и КМ, второй комплект этажных переключателей ПЭ1 и ПЭ12-2.

Точная остановка кабины происходит по сигналу, поступающему в схему управления от индуктивного датчика точной остановки ДТО (рис. 3.29, б), расположенного на кабине. Магнитопровод этого датчика замыкается шунтом, находящимся в шахте, при расположении кабины на уровне, соответствующем точной остановке.

Для повышения производительности и комфортабельности лифта кабина и шахта снабжены механизированными раздвижными дверями с асинхронным двигателем с к.з. ротором М2 (рис 3.29, в). Напряжение к обмотке статора М2 подводится контактором открывания дверей КДО или закрывания КДЗ. Операции открывания и закрывания дверей предшествуют движению кабины.

Напряжение к лифтовой установке подается через рубильник В и автомата ВА1 и ВА.

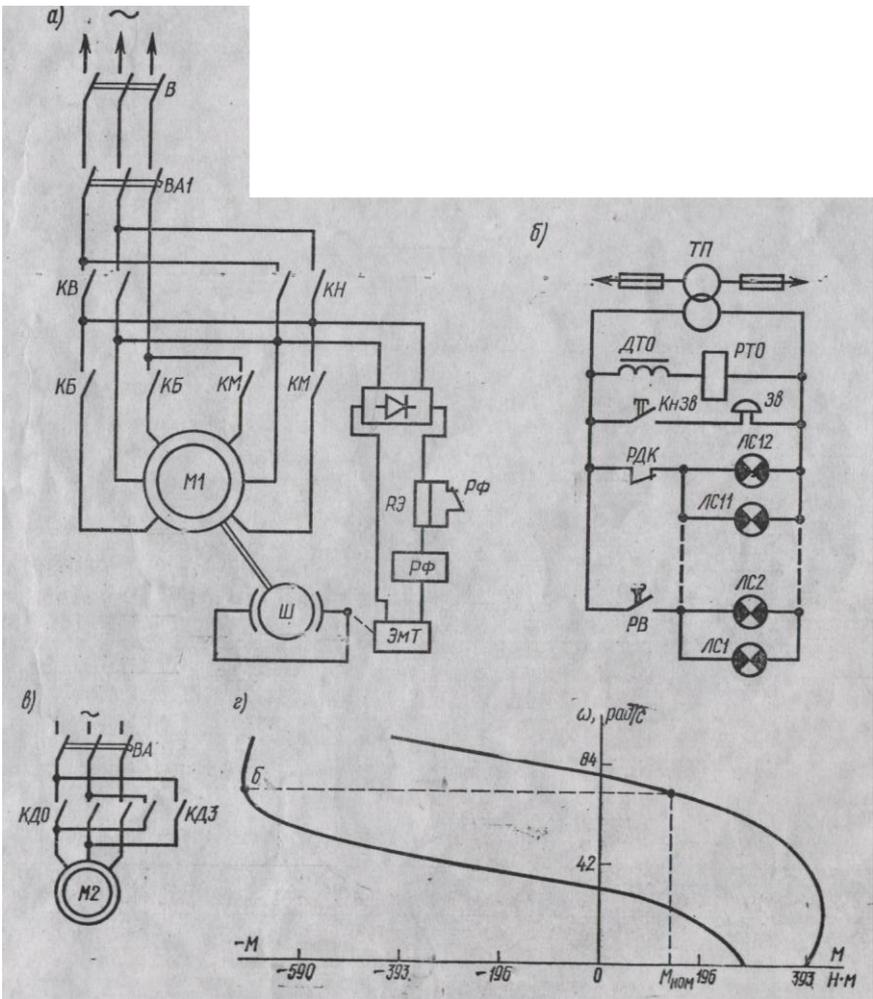
Кабина лифта находится на втором этаже. Двери шахты и кабины закрыты. При этом замкнуты:

- подпольный контакт ВКП1 (четвертая строка – цепь защиты и блокировки);

- контакты дверей ВКДШ;
- контакты замков ВКДЗ1 – 1,2 ÷ ВКДЗ12-1,2 шахты;
- дверей кабины ВКД.

Включены также:

- реле контроля дверей РДК
- реле пола и кабины РПК.



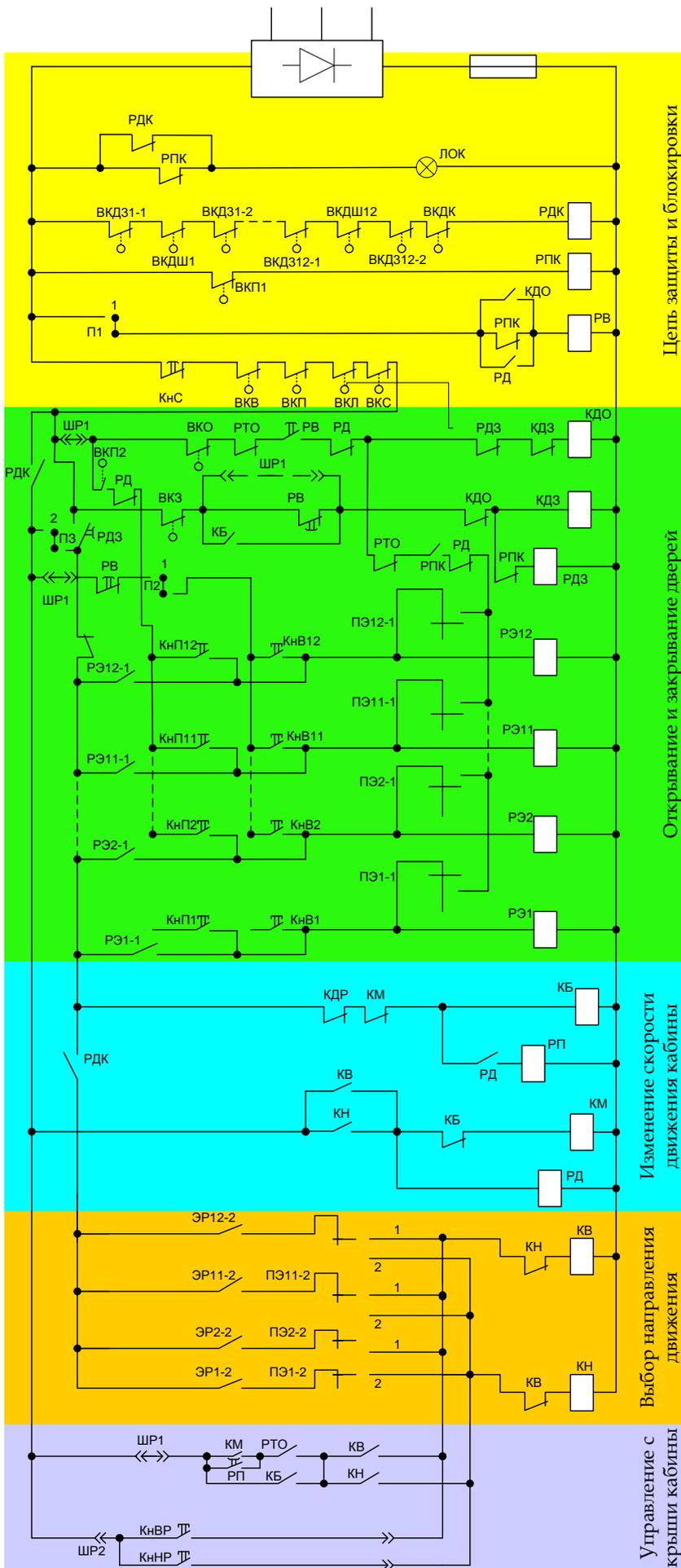


Рис. 3.29. Электрическая схема лифта со скоростью движения кабины 0,65 м/с; *а* — схема включения двигателя и тормоза; *б* — схема сигнализации; *в* — схема включения двигателя дверей кабины; *г* — механические характеристики двухскоростного короткозамкнутого лифтового двигателя М1; *д* — схема управления лифтом

## Тема 6. Типовые схемы управления насосами

В системах водоснабжения, перекачивания различных жидкостей широко используются лопастные насосы.

Обычно насосы малой и средней производительности приводятся в действие асинхронными двигателями с к.з. ротором.

При необходимости производительность установки регулируется изменением числа работающих насосов.

Схемой такой установки предусмотрены различные режимы управления двигателями насосов:

- автоматическое – в зависимости от требуемой производительности;
- дистанционное – с диспетчерского пульта;
- местное – с помощью кнопок, расположенных непосредственно у насосных агрегатов.

При малом расходе жидкости для равномерного изнашивания оборудования схема должна предусматривать поочередное использования любого насоса в качестве рабочего.

На рис.6.1 приведена схема насосной установки водоотливной машины.

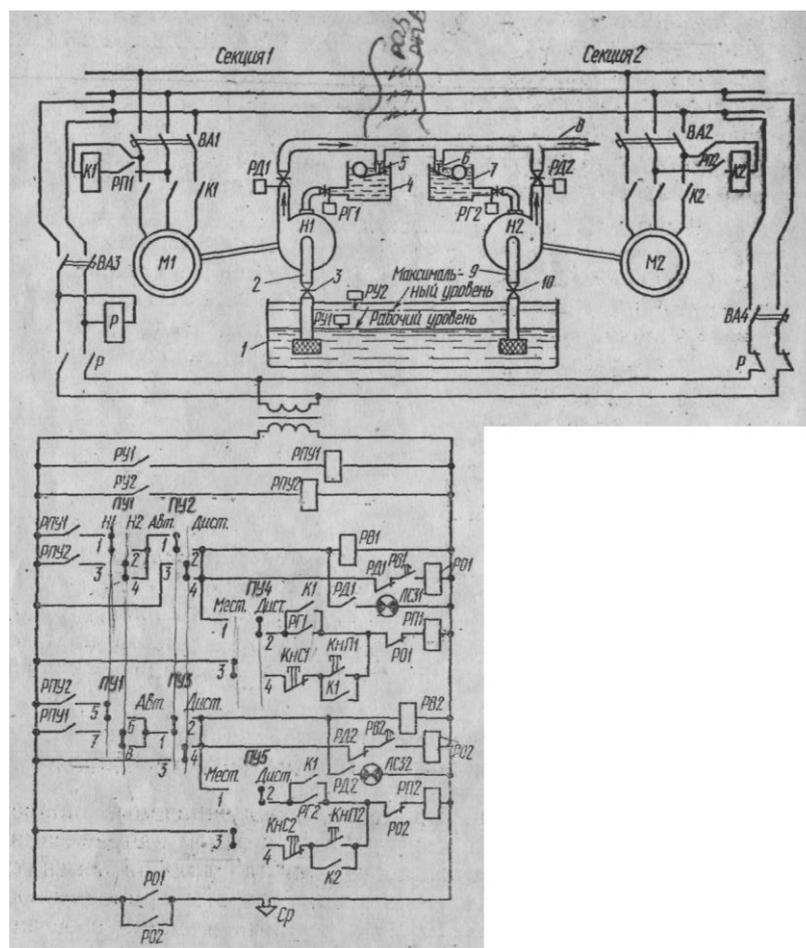


Рис.6.1 Электропривод насосной установки

Из водосборного бассейна 1 по всасывающим трубопроводам 2 и 9, в которых установлены обратные клапаны 3, 10, насосы Н1, Н2 перекачивают воду в напорную магистраль 8.

При пуске двигателя заполняется водой из заливных баков 4, 7 насосы и всасывающие трубопроводы.

Максимальный уровень воды в заливных баках поддерживается поплавковыми клапанами 5, 6 и контролируется гидравлическими реле РГ1 и РГ2

В нагнетающей линии каждого насоса установлены реле давления РД1 и РД2, которые отключают двигатель насоса при давлении ниже заданного.

Для автоматической работы насосов водоотливной машины в бассейне расположены поплавковые реле уровня РУ1, РУ2. Реле РУ1 включает один из двигателей при рабочем уровне воды в бассейне. При аварийном уровне воды второе реле РУ2 обеспечивает одновременную работу двух насосов.

Для большей надежности двигатели М1, М2 и цепи управления ими питаются от двух секций шин подстанции.

Включаются двигатели контакторами К1, К2, а цепи управления – промежуточным реле Р.

Автоматический режим работы насосов определяется положением переключателей:

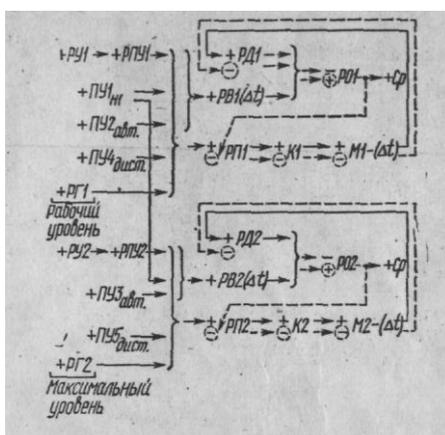
- режима работы ПУ2, ПУ3 – в позиции «Авт»;
- места управления ПУ4, ПУ5 – в позиции «Дист».

Очередность включения насосов при изменении уровня воды в бассейне устанавливается универсальным переключателем ПУ1.

При рабочем насосе Н1 (ПУ1 находится в положении Н1) замыкание контакта поплавкового реле РУ1 приводит к включению промежуточного реле уровня РПУ1. Замкнувшийся контакт РПУ1 подает питание на катушку промежуточного реле РП1 (по цепи – контакты 1-2 ПУ1 ПУ2, ПУ4, контакты реле РГ1 и РО1). Реле РП1 включает контактор К1, который подводит питание к двигателю М1.

Одновременно с катушкой реле РП1 получает питание реле времени ВВ1, которое с выдержкой времени замкнет свой контакт в цепи катушки реле отключения РО1. Если пуск двигателя прошел нормально и в нагнетающей линии насоса Н1 давление поднялось до заданного уровня, то к моменту замыкания контакта ВВ1 разомкнется контакт РД1 и реле РО1 будет продолжать оставаться в отключенном состоянии. При ненормальной работе насосного агрегата контакт реле РД1 в цепи катушки реле РО1 останется замкнутым, последнее отключит реле РП1, двигатель М1 и включит сирену Ср.

Если при работающем насосе Н1 уровень воды в бассейне повысится до максимально допустимой отметки, то поплавковое реле РУ2 включит промежуточное реле РПУ2 и реле РП2 через контакты 5-6 переключателя ПУ1, 1-2 переключателя ПУ3, 1-2 переключателя ПУ5. Произойдет пуск двигателя М2. Последовательность работы электрической аппаратуры схемы управления при



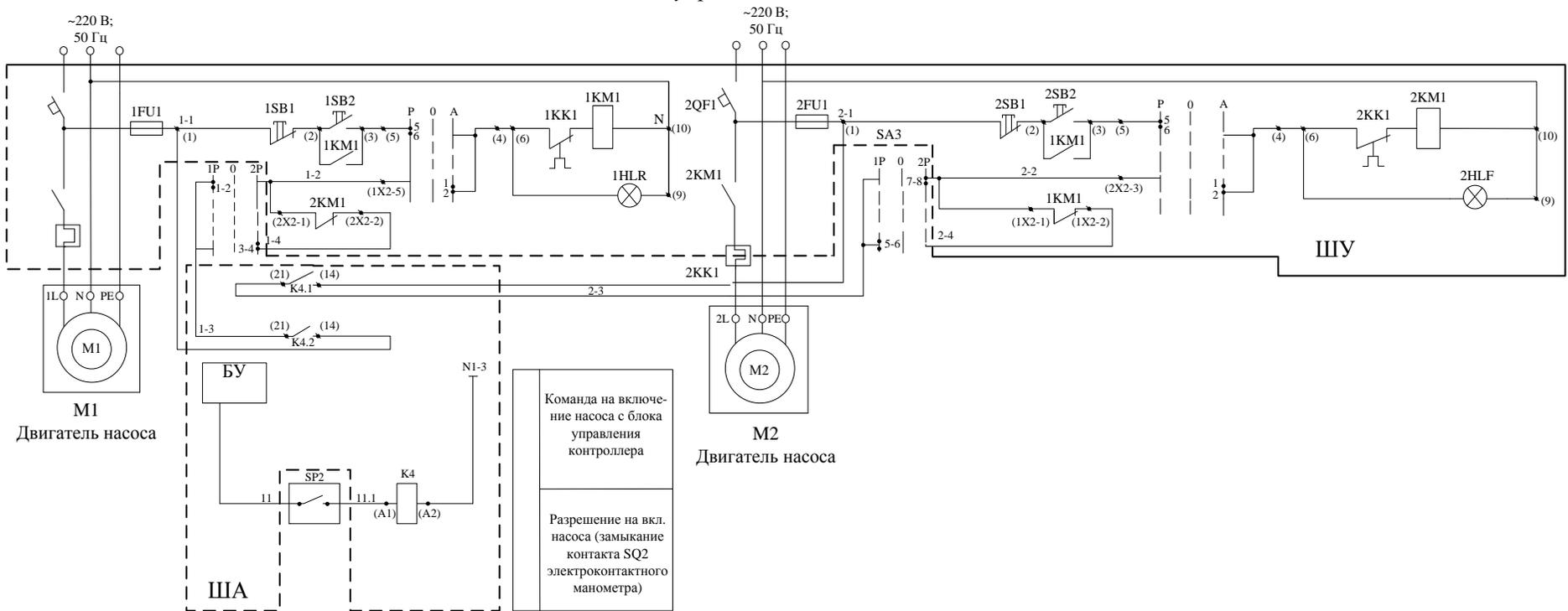
автоматическом режиме поясняется следующей диаграммой:

Пунктирными линиями обозначены связи при аварийном режиме работы без давления в нагнетающих трубопроводах насоса. При снижении уровня воды вначале теряет питание реле РПУ2 и отключает двигатель М2, а в случае падения уровня до отметки ниже рабочей отключается реле РП1 и теряет питание двигатель М2.

Переход на режим местного кнопочного управления насосными агрегатами производится поворотом переключателя ПУ4 для первого агрегата и ПУ5 для второго агрегата в положение «Мест» и последующим воздействием на соответствующие кнопки КнП1, КнС1 и КнП2, КнС2. Переключателя ПУ4 и ПУ5 исключают возможность одновременного автоматического и кнопочного управления.

При дистанционном управлении (не автоматическом) с диспетчерского пункта двигатель М1 включается поворотом переключателя ПУ2, а двигатель М2 – поворотом переключателя ПУ3 в положение «Дист». Этому режиму должно соответствовать положение «Дист» переключателей ПУ4 и ПУ5. В режиме дистанционного управления так же, как и в автоматическом режиме, действуют цепи отключающих реле РО1 и РО2.

### Схема управления сдвоенного насоса



Условные обозначения:

В шкафу управления (ШУ) находится следующая аппаратура управления:

1QF1,2QF1 - вводной выключатель с отсечкой по максимальному току;

1 KM 1, 2KM1 - магнитный пускатель;

1FU1,2FU1 - предохранитель плавкий;

1SB1, 2 SB1 - кнопка «СТОП»;

1SB2,2 SB2 - кнопка «ПУСК»;

1SA1, 2 SA1 - переключатель режимов «РУЧНОЙ», «АВТОМАТ»;

1KK1,2KK1 - тепловое реле;

1HLR, 2 HLR - сигнализатор.

На щите автоматики (ЩА) расположена следующая аппаратура:

Контроллер (не показан на схеме);

Блок управления;

K4 - промежуточное реле;

Аппаратура защиты контроллера (автоматические выключатели, не показаны на схеме).

Непосредственно возле насосов (на стене) находится:

SA3 - переключатель выбора насосов «ОСНОВНОЙ», «РЕЗЕРВНЫЙ»;

Электроконтактный манометр.

Выключатели 1SA1 и 2SA1 для каждого из насосов могут находиться в одном из трёх положений- «Р», «О», «А». Если поставить их в ручное положение, то запуск будет производиться кнопками «Пуск» и «Стоп». Если в «А», то запуск производится от сигнала контроллера.

Описание схемы:

Если включен насос № 1, то напряжение подается на пускатель 1KM1. И одновременно в цепи второго пускателя размыкается одноименный контакт. От максимальной токовой нагрузки «КЗ» насосы защищают плавкие предохранители и размыкатели QF. От превышения нагрузки насосы защищают тепловые реле KK1.

Схема имеет возможность работы в двух режимах: ручном и автоматическом. Для начала переключателем SA3 выберем 1-й насос основным, а второй резервным. При работе в ручном режиме переключатель SA1 ставится в положение Р.

Схемы работы:

Схема имеет возможность работы в двух режимах: ручном и автоматическом. Для начала переключателем SA3 выберем 1-й насос основным, а второй резервным. При работе в ручном режиме переключатель SA1 ставится в положение Р.

Запуск насоса производится нажатием кнопки «Пуск» в нашем случае это 1SB2, в результате сигнал питания проходит по цепи управления через плавкий предохранитель 1FU1, замкнутую кнопку «Стоп» 1SB1, нажатую кнопку «Пуск» 1SB2, переключатель SA1 и включенную катушку пускателя 1KM1 и включает сигнализатор 1HLR.

Контакты пускателя 1KM1 : основные замыкают питание двигателя, а блок-контакты работают следующим образом: 1-й (нормально разомкнутый) шунтирует кнопку «Пуск» 1SB2 2-й (нормально замкнутый) размыкается в цепи управления двигателем второго насоса.

Выключение двигателя 1-го насоса осуществляется нажатием кнопки «Стоп», в нашем случае 1SB1 вследствие чего размыкается цепь управления двигателем, пропадает напряжение на катушке 1KM1 и пропадает питание в цепи управления двигателем, после чего выключается сигнализатор 1HLR.

В автоматическом режиме переключатель SA1 ставится в положение А. Далее управление производится аналогичным образом, управляющий сигнал поступает от контроллера через блок управления «БУ», замкнутый контакт ЭКМ и запитывает катушку реле K4, после чего контакты реле K4 замыкают контакты пускателя KM1 и далее сигнал проходит по той же цепи управления.

Управление двигателем 2-го насоса проходит аналогично, применительно к его обозначениям. Защита насосов:

- от «сухого хода» предусмотрена установкой ЭКМ;
- от максимальной токовой нагрузки «КЗ» вводными выключателями 1QF1, 2QF1;
- от превышения нагрузки защищают тепловые реле 1KK1,2KK1

## Тема 7. Типовые схемы управления компрессорными установками

Технологическая схема компрессорной установки приведена на рис. 7.1.

При давлении, равном верхнему пределу, срабатывает, контакт  $M_{в1}$ . Нижние пределы давления, при которых срабатывают контакты манометров, устанавливаются различными. Давление, при котором замыкается контакт  $M_{н1}$ , несколько выше давления срабатывания контакта  $M_{н2}$ . Схемой управления компрессорной установкой предусмотрено отключение электродвигателей компрессоров при повышении давления в воздухохранильнике до верхнего предела, а при снижении давления до нижнего предела вначале включается один компрессор и, если после этого давление будет продолжать снижаться, вступает в действие второй.

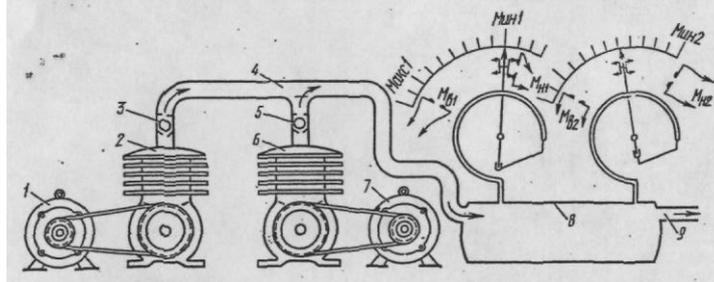


Рис. 7.1. Технологическая схема компрессорной установки

Схема управления электроприводом компрессорной установки приведена на рис. 7.2. Двигатели  $M1$  и  $M2$  включаются в сеть контакторами  $K1$ ,  $K2$  через автоматы  $BA1$ ,  $BA2$ , имеющие тепловую и максимальную защиту. Управление компрессорами может быть ручным и автоматическим. При ручном управлении двигатели включаются и отключаются универсальными переключателями  $ПУ1$  и  $ПУ2$ , контакты которых введены в цепь катушек контакторов  $K1$  и  $K2$ . При автоматическом управлении  $K1$  в  $K2$  включаются промежуточные реле  $P1$  и  $P2$ . Если давление в магистрали равно верхнему пределу, оба двигателя отключены. При снижении давления до величины нижнего предела, измеряемого первым манометром, его контакт  $M_{н1}$  (см. рис. 7.1) замкнется в цепи катушки реле  $P1$ , которое включит двигатель  $M1$  (рис. 7.2). В результате работы компрессора давление будет расти. Однако реле  $P1$  останется включенным, так как цепь контакта  $M_{н1}$  будет шунтирована размыкающим контактом реле отключения  $P0$  и замкнувшимся контактом реле  $P1$ . При повышении давления до верхнего предела замкнется контакт манометра  $M_{в1}$ , который включит реле  $P0$ , и через  $P1$  и  $K1$  отключит двигатель первого компрессора. Если же расход воздуха в магистрали окажется больше производительности первого компрессора, давление будет продолжать снижаться и при достижении нижнего (минимального) предела, измеряемого манометром  $M_{н2}$  замкнется контакт  $M_{н2}$ , который через промежуточное реле  $P3$  включит контактор  $K2$  двигателя второго компрессора. Оба компрессора будут работать, пока давление не достигнет верхнего предела, при котором контакт  $M_{в1}$  замкнувшись, включит реле  $P0$ . Последнее через  $P1$ ,  $P2$  и контакторы  $K1$  и  $K2$  отключит двигатели  $M1$  и  $M2$ . Схемой предусмотрена аварийная сигнализация. Если при двух работающих компрессорах давление в магистрали продолжает падать, то при замкнутом контакте  $M_{н2}$  останется включенным реле  $P3$ . При этом загорится сигнальная лампа  $ЛС$ , а через время, определяемое выдержкой реле  $PВ$ , включится сирена  $Ср$ .

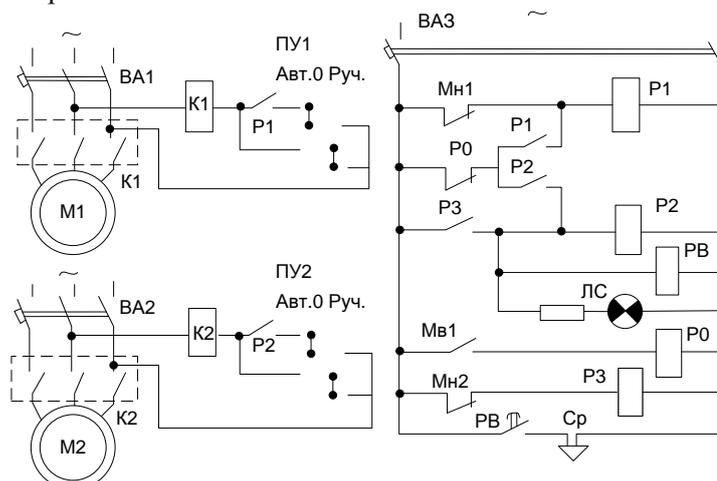


Рис. 7.2. Схема управления электроприводом компрессорной установки.

## Тема 8. Типовые схемы управления станками

Тиристорная система управления станком рядовой намотки.

### I. Общие сведения

Станок модели СРН-05М1 предназначен для открытой рядовой намотки электрическим проводом катушек на круглых или прямоугольных каркасах.

Конструкция станка позволяет вести намотку катушек одновременно на одном или двух каркасах. При этом возможно обеспечить: регулировку шага раскладки провода (бесступенчатая) 0,05-0,55 мм; усилие натяжения провода, Г при смотке неподвижной бобины: 20-100, при смотке с вращающейся бобины 50мм: 80-1000 скорость вращения шпинделя: на холостом ходу - 0-5000 об/мин, при максимальной нагрузке - 0-900 об/мин.

Станок состоит из следующих основных узлов: привода, задней бабки, механизма раскладки провода, механизма регулировки шага намотки, счетчика, механизма регулировки скорости вращения шпинделя и натяжного устройства (рис.13).

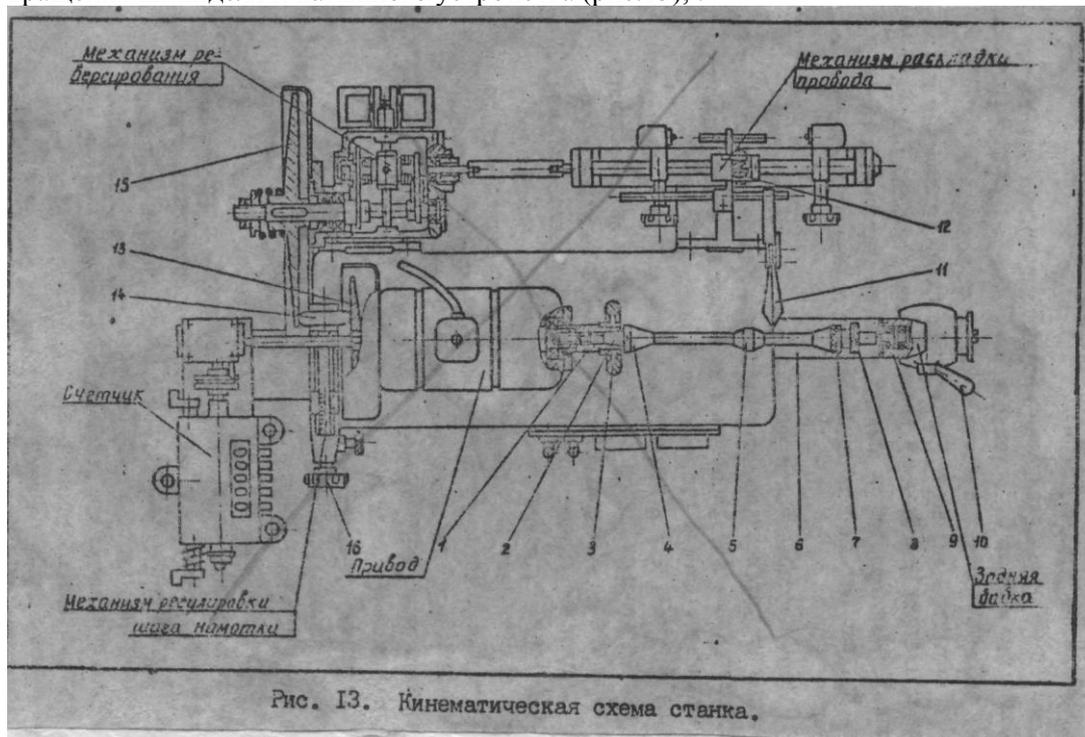


Рис. 13. Кинематическая схема станка.

Перед намоткой следующей катушки необходимо установить цифровой барабан на 0, затем сбросить показания счетчика на 0, т.е. установить счетчик в исходное положение.

Управляющий сигнал в электронную схему управления вращения шпинделем подается от индуктивного датчика. Привод датчика осуществляется от педали ножного управления через тягу. Возврат педали в первоначальное положение производится пружиной.

При смотке провода с вращающейся бобины предусмотрено автоматическое регулирование постоянства натяжения провода.

Включение станка в сеть производится вилкой Ш1 (рис. 15). Через двухполюсный тумблер S1 и предохранители FU1 и FU2 напряжение подается на трансформатор TV1.

Для обеспечения плавного регулирования числа оборотов двигателя М использована однофазная мостовая несимметричная схема (тиристоры в катодной группе). Сигналы управления открывают тиристоры VS1, VS2 поочередно, с определенным сдвигом по фазе относительно питающего напряжения. Первичная обмотка трансформатора TV2 включена в диагональ фазосдвигающего моста, состоящего из активных резисторов R1 и R2 в одном плече, регулируемой индуктивности L в другом, и двух полуобмоток 7-8, 8-9 трансформатора TV1. При изменении индуктивности реактивного плеча изменяется фаза напряжения на выходе моста (обмотка 1-2 трансформатора TV2). Установка минимальных оборотов двигателя производится резистором R2. Резисторы R3 и R4, включенные в цепи управляющих электродов тиристоров, служат для подбора начального момента отпираания тиристоров в связи с разбросом параметров последних.

Диоды VD7, VD8, включенные последовательно с тиристорами, служат для распределения величины обратного напряжения, что увеличивает надежность схемы. Диод VD11, включенный параллельно двигателю М, служит для увеличения устойчивости работы двигателя и улучшения

регулируемых характеристик. Диод VD4 - для разделения цепи торможения и рабочей цепи двигателя.

При нажатии педали ножного управления выключается микропереключатель SV4 (занимает положение, изображенное на схеме) и отключается реле KM2, напряжение через микровыключатели SV4 SV5 и контакты реле KM2 подается на двигатель.

Быстрый останов двигателя обеспечивается за счет электродинамического торможения, которое осуществляется при короткозамкнутом якоре и подаче на обмотку возбуждения постоянного тока. Торможение двигателя осуществляется как при отпускании педали ножного управления, так и при срабатывании счетчика (на счетчике установлен микропереключатель SV5). В обоих случаях срабатывает реле KM2 и напряжение постоянного тока от селенового выпрямителя VD1 через контакт KM2.1 подается на обмотку возбуждения двигателя, а второй контакт KM2.3 закорачивает якорь. Во избежание искрения контакта KM2.3 в момент тормоза параллельно ему подключен конденсатор C1.

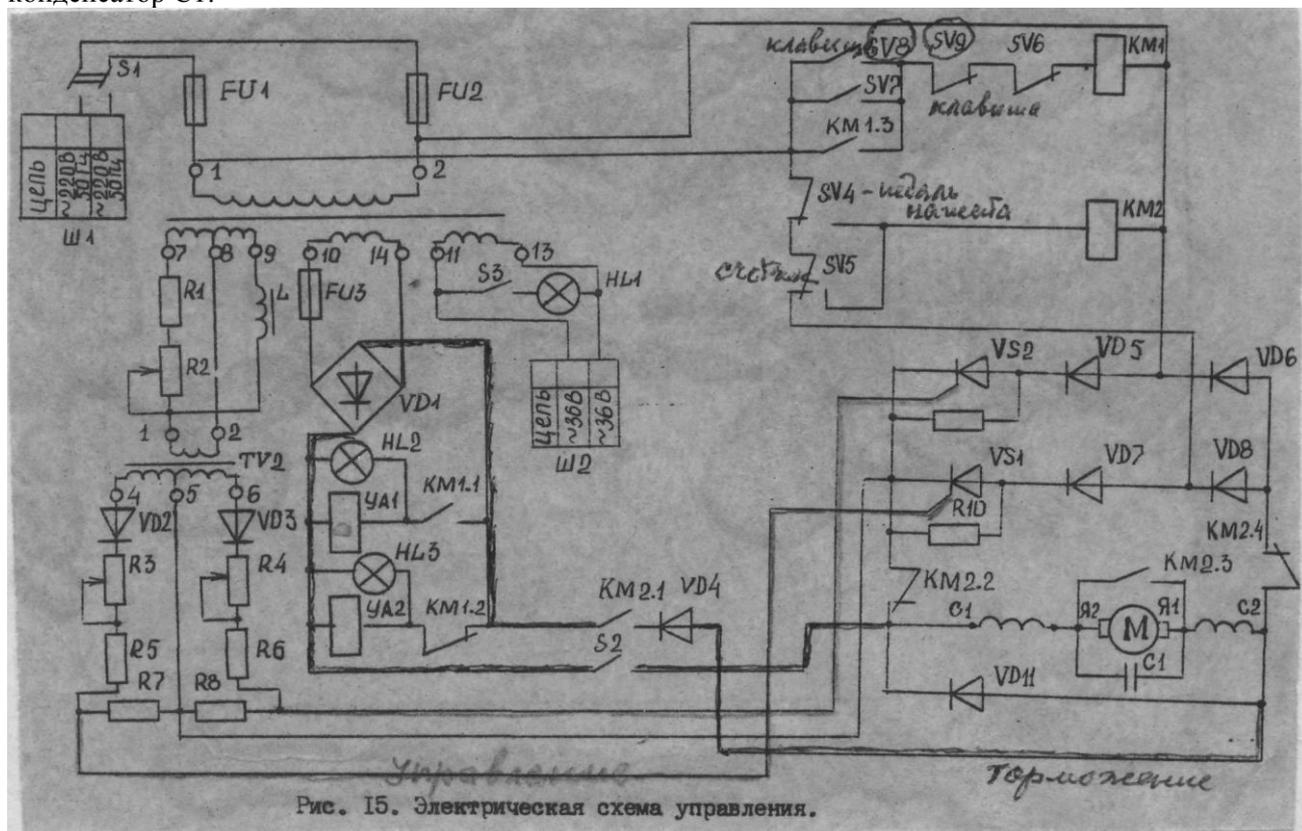


Рис. 15. Электрическая схема управления.

Электромагниты YA1 и YA2 раскладывающего устройства включаются поочередно через контакты реле KM1. В левом крайнем положении нажимается микропереключатель SV7, при этом включается реле KM1 и становится на самоблокировку, В крайнем правом положении каретки нажимается микропереключатель SV6, который разрывает цепь самоблокировки реле KM1. На панели управления расположены клавиши с микропереключателями SV8 и SV9, дублирующие работу микропереключателей SV6 и SV7, а также сигнальные лампочки HL2 и HL3, указывающие направление намотки.

Для устранения радиопомех на станке установлены конденсаторы C2 и C3.

### Схема управления токарного станка модели 16Б20А.

Токарный станок модели 16Б20А – станок высокой точности. Он предназначен для выполнения токарных работ с наибольшим диаметром обрабатываемого изделия равным над станиной 400мм и над суппортом – 200мм, с наибольшей длиной изделия 710мм. Конструктивно токарный станок включает в себя станину, на которой неподвижно закреплена передняя бабка. В бабке расположены шпиндель и коробка скоростей. Ниже бабки находится коробка подач. Все электрооборудование станка расположено на станке и в шкафу управления, укрепленном на станке. Главный электрический двигатель, обеспечивающий главное движение и движение подачи, установлен на станине рядом с передней бабкой и коробкой подач. Включение,

отключение и реверсирование двигателя производится двумя рукоятками, расположенными соответственно на коробке подач и на каретке. Скорость шпинделя указывается на цифровом табло УСШ, установленном на шкафу управления. Над передней бабкой расположен пульт управления. На котором установлены выключатели местного освещения ВМО и охлаждения ВО и сигнальные лампы ЛС4, ЛСЖ, ЛМ1.

Принципиальная электрическая схема управления станком приведена на рис.7.13. На станке используется пять электродвигателей. Один постоянного тока М1, а остальные М2-М5 трехфазные асинхронные с к.з.ротором. Двигатель М1 – электродвигатель главного привода и подачи со встроенным тахогенератором питается от тиристорного преобразователя ТП. Электропривод позволяет регулировать скорость двигателя изменением напряжения на якоре в диапазоне  $Du=10$  (первая зона) и изменением напряжения на обмотке возбуждения двигателя в диапазоне  $D\phi=3$  (вторая зона). Вспомогательные двигатели М2 – электродвигатель насоса гидропривода; М3 – электродвигатель вентилятора гидропривода; М4 – электродвигатель быстрых ходов каретки и суппорта и М5 – электродвигатель насоса охлаждения.

В электрической схеме управления (рис.7.13б) предусмотрены следующие кнопки управления: Кн1 – кнопка «Пуск вентилятора» гидропривода; Кн2 – кнопка «Стоп», немедленно отключающая электродвигатель насоса гидропривода М2; Кн3 – кнопка «Аварийный стоп», отключающая всю схему управления станка от питающей сети; Кн4 – кнопка «Пуск гидравлики», включающая электродвигатель насоса гидропривода; Кн5 – кнопка «Быстрый ход» каретки и суппорта, включающая электродвигатель быстрых ходов М4.

Электродвигатель главного движения М1 управляется двумя заблокированными рукоятками – правой и левой, имеющими три положения: нижнее «Вперед», верхнее «Назад» и среднее «Стоп» и обеспечивающими пуск, реверс и остановку двигателя. Правая рукоятка воздействует на микропереключатели МП1 – МП3, левая на МП4-МП6. Диаграмма работы микропереключателей рукояток управления двигателем сведена в табл.7.1. Положение переключателя скорости шпинделя приведены в табл.7.2.

ВК2 (12) – переключатель скорости шпинделя (нажат при работе двигателя на шпиндель)

ВК3 – нажат при включении ????????????????????

ВК6 (а, ЛОЭ) – дверь шкафа (при закрытой двери разомкнут)

ВК1 (5) – разомкнут если не опущены огражд.патрона

ВК5 (1) – двери шкафа (замкн. при закрытых дверях)

Рн (6) – реле нулевой защиты

РС (а) – регулятор скорости

ВО (14) – выключатель охлаждения

ВА (а) – автомат

СЛО1, СЛО2 (а) – местное освещение зоны обработки (люминесцентный светильник)

ВМО (а) – выключатель местного освещения

ЛОЭ (а)– освещение электрошкафа

ВОЭ (а)– выкл.освещения электрошкафа

УСШ (а)– указатель скорости шпинделя

ВА1 (а)– авт.выключение главного электропривода

РД (6) – реле давления масла в гидросистеме

ЛМ1, ЛМ2 (а) – подключение схемы станка к питающей сети и наличие напряжения на схеме

ЛС3, ЛСЖ (а) – сигнализатор температуры масла в гидростатических опорах шпинделя (норм.ЛС3, превыш.темпер.ЛСЖ)

РТР (а) – реле сигнализ., встроенное в терморегулятор ТР (4), следящий за температурой масла в баке гидростанции

ППП (2)– переключатель, позволяющий проверять электрооборудование шкафа под напряжением (провека «П», работа «Р»)

Кн1 (3) – пуск вентилятора гидравлики

Кн2 (5) – стоп

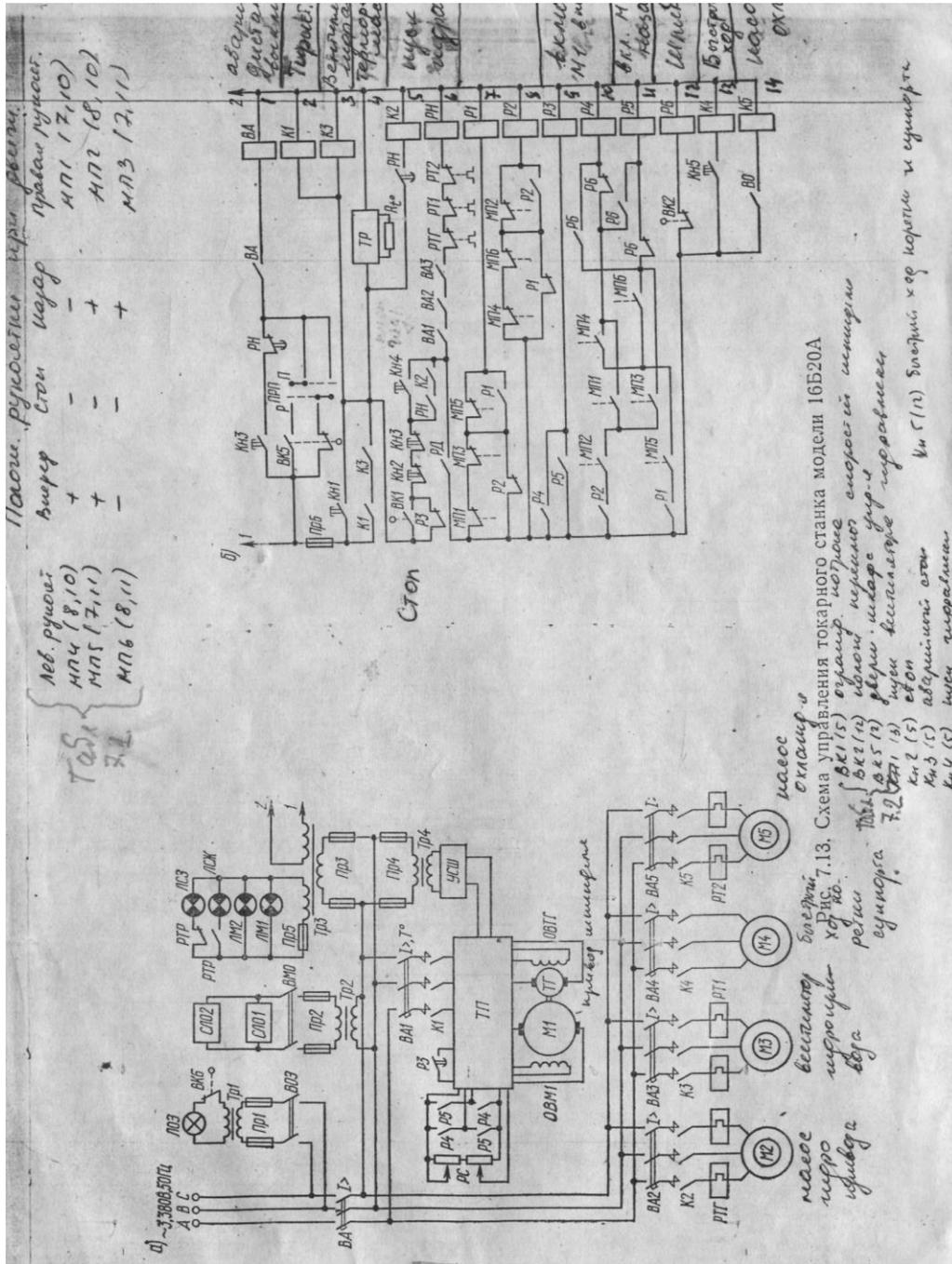
Кн3 (5) – аварийный стоп

Кн4 (5) – пуск гидравлики

Кн5 (12) – быстрый ход каретки и суппорта

Положение рукоятки при движении.

Левая рукоятка	Вперед	Стоп	Назад	Правая рукоятка
МП4 (8, 10)	+	-	-	МП1 (7, 10)
МП5 (7, 11)	+	-	+	МП2 (8, 10)
МП6 (8, 11)	-	-	+	МП3 (7, 11)



- 1 аварийный дистанционный выключатель
- 2 тиристорный преобразователь
- 3 вентилятор гидропривода
- 4 терморегулятор масла
- 5 6 пуск гидравлики
- 9 10 включение М1 вперед
- 11 включение М1 назад
- 12 шпиндель
- 13 быстрый ход
- 14 насос охлаждения

### Транзисторные электроприводы постоянного тока с ЧПУ и промышленных роботов

В восьмидесятые годы в промышленно развитых странах резко возрос выпуск широтно-импульсных

электроприводов постоянного тока (ШИЭП) на длительные ток до 90А при напряжении до 200В, предназначенных для управления двигателями, длительный момент которых достигает 180 н\*м. ШИЭП нашли широкое применение в станках, прессах, промышленных роботах, измерительных, графопостроительных устройствах и других механизмах.

Обеспечение диапазона регулирования скорости не менее 10 000 от аналогового сигнала  $\pm 10\text{В}$  при таких достоинствах способа управления, как высокое быстродействие, равномерность вращения, снижение удельного расхода меди в стали в силовых трансформаторах, дросселях и двигателях, снижение уровня высокочастотных помех в силовых цеховых сетях – является веским основанием для привлечения внимания разработчиков машин и механизмов к эти приводам, а также для их широкого распространения и применения.

В эти же годы в нашей стране появляются новые, более совершенные комплектующие, на базе которых происходит совершенствование ранее выпускавшихся ШИЭП и разработка новых исполнений, учитывающих растущие требования к ним.

В таблице приведены основные технические характеристики типоразмеров указанных серий. В комплекте с электроприводами могут использоваться двигатели серий ДП, ДПУ, 4ДПУ, ДПМ, ДК, ПБВ, 2П и другие, номинальный ток и напряжение которых не превышают указанных в таблице значений для каждого типоразмера.

Характеристика	Тип электропривода							
	ЭШИР-1А	ЭШИР-60	ЭТЗК	Исполнение ЭШИМ-1				
				кассетное		блочное		
Выходное напряжение В	140	60	150	60		150 и 220		180
Длительный ток, А	16	6	16	4	8	16	25	40
Максимальный ток, А	50	25	40	10	20	40	63	100
Диапазон регулирования скорости	10 <sup>4</sup>							
Полоса пропускания, Гц	120			100				
Управляющий сигнал, В	$\pm 10$							
Входное сопротивление, кОм	2			2,7		20		
Вход сигнала «разрешение работы»	Есть							
Выход сигнала «готовность к работе»	Нет			Есть				
Выход сигнала «управление тормозом»	Нет			Есть				
Число координат	1	2	3	От 1 до 6		От 1 до 3		
Гальваническая развязка по координатам	-	Есть		Нет		Есть		

Серийный транзисторный широтно-импульсный электропривод ЭШИР -1А выпускается взамен разработанного в конце семидесятых привода ЭШИР-1. От своего предшественника ЭШИР-1А отличается более высоким выходным напряжением, более широкой гаммой применяемых двигателей, меньшей массой преобразователя и силового трансформатора, меньшей стоимостью, существенно повышенной надежностью. Выходное напряжение в электроприводе ЭШИР-1А повышено со 115 до 150 В за счет применения более высоковольтных транзисторов. Увеличился и запас транзисторов по напряжению. Благодаря введению в схему устройства ограничения всплесков тока при переключениях силовых транзисторов и рациональной последовательности чередования состояний проводимости силовых ключей снизились потери энергии в каждом ключе и, следовательно, уменьшился их нагрев и повысилась надежность. Кроме того, надежность существенно повышена благодаря введению ряда новых защит, отсутствовавших в приводе ЭШИР-1. Электропривод ЭШИР-1А обладает следующими видами защит: ограничением напряжения источника питания в режиме рекуперации энергии; защитой силовых транзисторов с контролем падения напряжения в силовых ключах в режиме насыщения; времязащитой при перегрузках; защитой от понижения напряжения питающей сети ниже допустимого значения и от обрыва одной фазы; защитой от несоответствия фактической скорости заданной при обрывах связей или отказах элементов управления.

Срабатывание защит индицируется на лицевой панели преобразователя.

Для повышения надежности работы привод снабжен устройством торможения, которое приводится в действие как при срабатывании защиты от несоответствия фактической и заданной скоростей, так и при случайных отключениях питающей сети во время движения. Устройство аварийного торможения с помощью пары тиристорных, соединенных встречно-параллельно, закорачивает якорь двигателя. Предварительно заперев транзисторные силовые ключи.

Конструктивно электропривод ЭШИР-1А оформлен в виде блока преобразователя, в котором размещена вся электронная часть силового трансформатора, якорного дросселя и исполнительного двигателя. Каркасно-кассетное исполнение блока преобразователя и одностороннее присоединение соединительных жгутов создает удобство при наладке, эксплуатации и ремонте. Электропривод ЭШИР-1а выпускается серийно.

Электропривод ЭШИР-60 разработан для приборов контроля и управления при шлифовании, а также для механизмов подачи и балансировки новых шлифовальных станков. Предназначен для управления двумя двигателями малой мощности. в основном серии ДП. Большинство технических решений узлов унифицировано с приводом ЭШИР-1А. Вместе с тем двухкоординатное исполнение позволило создать общий узел силового источника питания с разрядным ключом, обеспечивающим ограничение напряжения в режиме рекуперации. Электропривод ЭШИР-60 имеет комплекс защит такой же, как в приводе ЭШИР-1А, и, кроме того, устройство для подключения двух конечных выключателей, каждый из которых прекращает движение в одном направлении, но сохраняет в противоположном.

Конструктивно привод ЭШИР -60 выполнен в каркасе, в котором размещены кассеты с электронной частью, а также силовой трансформатор и два якорных дросселя.

В настоящее время электропривод ЭШИР-60 подготовлен к серийному производству.

Электропривод ЭТЗК предназначен для быстродействующих механизмов подачи и перемещений станков, в частности станков для сверления печатных плат с производительностью до 400 рабочих операций в минуту. Основное исполнение – трёхкоординатное, блочное. В состав привода входят силовой трансформатор, один блок питания, три блока регулирования и три дросселя якорной цепи. Для удобства наладки и ремонта все узлы блока питания и блоков регулирования собраны на отдельных платах, вставляющихся в каркас и присоединяемых разъёмами.

Привод ЭТЗК по большинству технических решений унифицирован с приводами ЭШИР-1А и ЭШИР -60, выполняет те же функции управления и защиты. Отличается от них лишь тем, что в нём упрощена схема питания цепей управления, существенно снижена масса блоков регулирования благодаря искусственной вентиляции и введена защита на случай выхода из строя вентилятора. Электропривод ЭТЗК также подготовлен к серийному производству.

Электропривод ЭШИМ-1 является новейшей разработкой и предназначен прежде всего для механизмов промышленных роботов, а также для автоматизированных станков, высокопроизводительных прессов, измерительных машин и т.п., оснащённых системами ЧПУ. Большая номенклатура типоразмеров по мощности и по числу координат (см. таблицу), наличие сигналов обмена с ЧПУ, высокая надёжность определяют широкую область их применения и большой объём выпуска. Предназначение для механизмов роботов обусловило реализацию в ЭШИМ-1 таких требований, как увеличение числа координат, сокращение потерь в силовых ключах для уменьшения общего тепловыделения в электрошкафу и снижения массы и габаритов преобразователей, повышение надёжности.

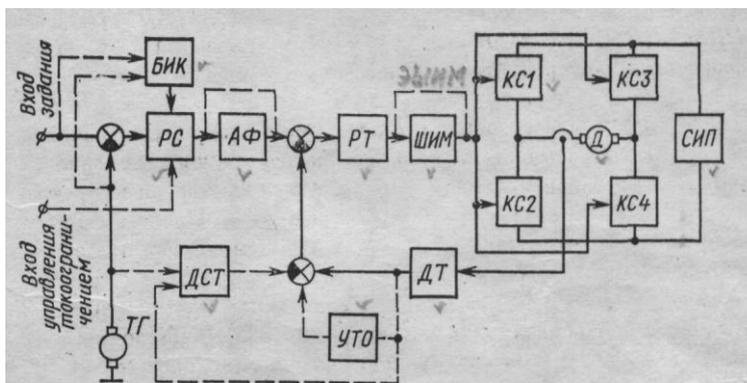
Конструктивное оформление электропривода ЭШИМ-1 имеет два вида: блочное и кассетное. В кассетном исполнении выпускаются преобразователи малых габаритных размеров и устанавливаются до шести координат с блоком питания в одном каркасе; соединения между блоками и внешние присоединения выполняются на разъёмах. В блочном исполнении один блок питания выпускается в комплекте с блоками регулирования, от одного до трёх на один комплект. Кроме того в комплект привода входят силовой трансформатор и якорные дроссели.

Электропривод снабжён следующими устройствами защиты: ограничением напряжения источника питания в режиме рекуперации энергии; защитой силовых транзисторов по максимальному току; защитой от понижения и повышения напряжения в питающей сети, а также от обрыва фазы; защитой повышенного быстродействия от несоответствия фактической скорости и заданной; защитой по термодатчикам, установленным в силовых транзисторных ключах и в двигателе; защитой при отказах устройства ограничения напряжения источника питания в режиме рекуперации энергии; защитой от коротких замыканий в цепях управления.

Индикация срабатывания системы защит осуществляется светодиодами.

В аварийных ситуациях, а также при внезапных отключениях питающей сети вводится в действие узел аварийного торможения. Для управления электроприводом ЭШИМ-1 используются следующие входы; задания основной и вспомогательный; управления токоограничением; «разрешение работы» «сброс защиты». Привод выдаёт сигналы «готовность к работе» и «отклонение тормоза» изолированными контактами встроенных реле.

Области применения транзисторных электроприводов определяются в основном такими достоинствами, как



Структурная схема электроприводов:

Д — электродвигатель; КС1—КС4 — силовые ключи; СИП — силовой источник питания; ШИМ — широтно-импульсный модулятор; РТ — регулятор тока; ДТ — датчик тока; УТО — устройство токоограничения; АФ — активный фильтр; РС — регулятор скорости; БИК — блок изменения коррекции; DST — датчик статического тока; ТГ — тахогенератор

широкая полоса пропускания (100-120Гц) и высокая равномерность вращения двигателя при диапазоне регулирования  $10^4$ . Все описанные приводы обладают этими характеристиками, так как построены на сходных функциональных узлах и структурных связях. Обобщённая структурная схема приводов приведена на рисунке. Общие для всех приводов связи показаны на схеме сплошными линиями, а связи, характерные для каждого конкретного исполнения, - пунктирными.

Во всех приводах якорь двигателя Д подключается к силовому источнику питания СИП через мостовой импульсный усилитель мощности, содержащий четыре транзисторных ключа КС. Силовая цепь в ключах коммутируется мощными транзисторами в параллельном включении, а управление ключами производится через входные оптодиодные элементы и согласующие импульсные усилители.

В традиционной двухконтурной структуре подчинённого регулирования контур тока образуется пропорциональным регулятором тока РТ, широтно-импульсным модулятором ШИМ и датчиком тока ДТ. Сигнал обратной связи по току вычитается из сигнала задания тока на входе РТ.

Активный фильтр с передаточной функцией может быть представлен выражением:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{p^2 + 1,4\omega_{\phi}p + \omega_{\phi}^2},$$

где  $\omega_{\phi}$  – частота среза фильтра.

Фильтр служит для подавления резонансных всплесков, обусловленных упруговязкими связями в механизме.

Блок изменения коррекции (БИК), содержащий управляющий ключ, предназначен для переключения цепи обратной связи регулятора скорости в целях снижения полосы пропускания привода в 2,5-4 раза на высоких скоростях, где повышенная пульсация тахогенератора вызывает недопустимо большую пульсацию тока в якоре.

БИК вводится в действие на скоростях  $n \geq 0,2n_{ном}$ .

В приводах ЭШИР и ЭТЗК блок БИК управляется сигналом задания, а в приводах ЭЭШИМ – сигналом тахогенератора. Поскольку в приводах ЭШИМ токоограничение осуществляется ограничением уровня выходного сигнала регулятора скорости, в этих приводах предусмотрен вход управления токоограничением. Внешнее управление токоограничением позволяет использовать эти приводы в механизмах захвата, давления на упор или растяжения с дозируемым усилием.

Преобразователь представляет собой двухконтурную структуру, являющуюся дальнейшим развитием серийно выпускаемого электропривода ЭШИР1 и содержит следующие основные узлы: регуляторы скорости РС и тока РТ, активный фильтр АФ, усилитель мощности УМ, датчики тока ДТ и статической составляющей тока ДСТ, устройство токоограничения УТО, блоки изменения коррекции БИК и защит БЗ (рис.1, а).

БИК увеличивает постоянную времени ПИ-регулятора скорости на средних и больших скоростях ( $n \geq 0,3n_n$ ) для уменьшения пульсаций тока в якоре, вызванных повышенными пульсациями выходного напряжения тахогенератора, и уменьшает эквивалентную постоянную при переходных процессах под нагрузкой в функции производной статической составляющей якорного тока в зоне малых скоростей ( $n \geq 0,0003n_n$ ) для компенсации негативного влияния нелинейной нагрузки типа «сухое трение».

БЗ защищает электропривод: при обрыве цепи тахогенератора или нарушении логики работы преобразователя – от превышения фактической скорости над заданным значением: при перегрузке двигателя (эквивалент тепловой защиты); от понижения напряжения при обрыве фазы питающей сети; от перегрева при отказе вентилятора.

БЗ обеспечивает аварийное торможение двигателя при отключении сети (для исключения свободного выбега) и при срабатывании вышеперечисленных защитных узлов. Для улучшения диагностирования работы узлов БЗ индицируется светодиодами.

Усилитель мощности УМ – основное звено преобразователя, в котором происходит преобразование постоянного напряжения  $U_{сип}$ , подводимого к якору двигателя, в регулируемое требуемой величины и заданной полярности. УМ в основном определяет динамические и массогабаритные показатели преобразователя. Функциональная схема УМ представлена на рис.1,б. Широтно-импульсные модуляторы ШИМ1 и ШИМ2 осуществляют модуляцию выходного напряжения РТ соответственно – различной полярности с частотой модуляции, задаваемой генератором пилообразного напряжения ГПН.

Для обеспечения линейности электромеханических характеристик электропривода во всех четырех квадрантах в УМ принят поочередный несимметричный алгоритм коммутации с совместным управлением исключающим зону прерывистых токов и обеспечивающим при той же частоте коммутации меньшие пульсации тока, чем симметричный. Блок коммутации БК представляет собой логическое устройство, распределяющее последовательность импульсов на выходе одного из ШИМ в четыре последовательности в соответствии с заданным алгоритмом. Поэтому при формировании любой полярности выходного напряжения УМ в определённой последовательности коммутируются все четыре силовых ключа К1 – К4. При этом потери распределены равномерно между ключами, частота коммутации ключей в 2 раза ниже частоты коммутации напряжения на нагрузке и соответственно уменьшена величина потерь в каждом

ключе. Кроме того, БК формирует раздвижку управляющих импульсов вертикали моста для ограничения величины сквозного тока.

Импульсные усилители ИУ1 – ИУ4 обеспечивают согласование выходов БК со входами К по мощности.

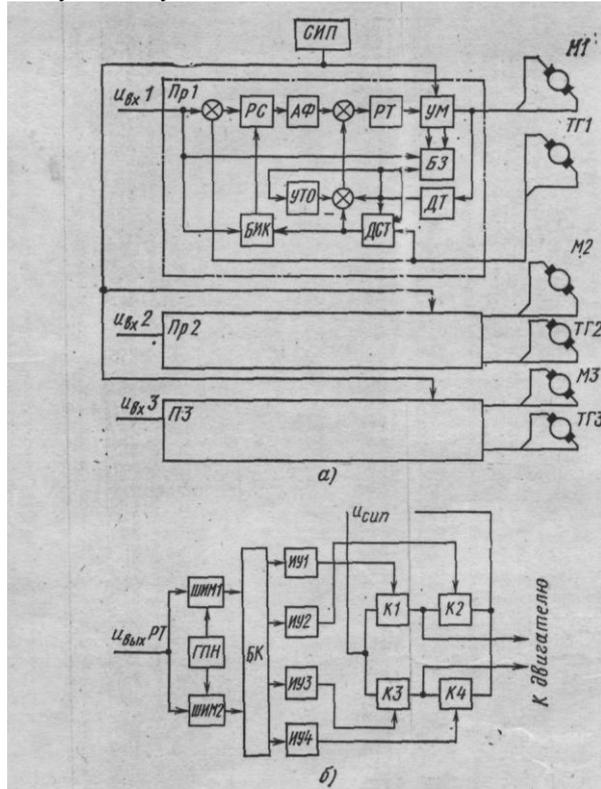


Рис. 1. Структурная схема:

а — электропривода ЭТЗК150-16/40; б — усилителя мощности электропривода ЭТЗК150-16/40

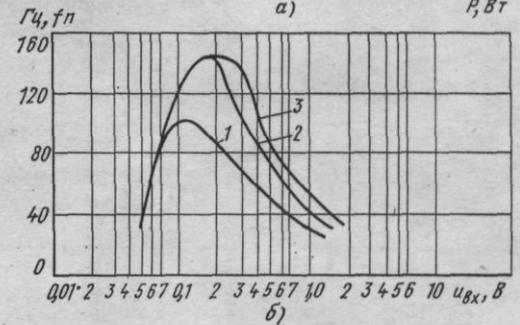
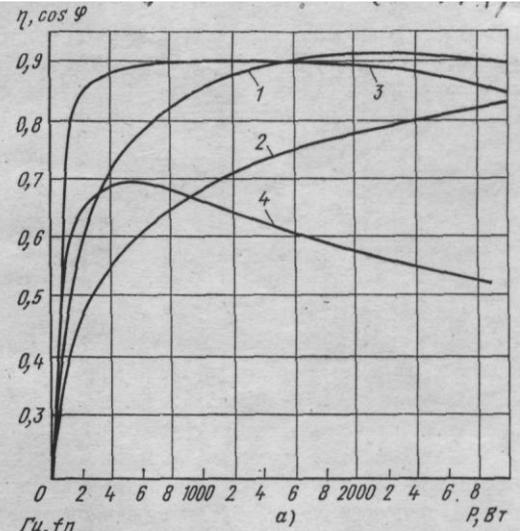


Рис. 2. Экспериментальные зависимости:

а — КПД и  $\cos \varphi$  СИП от мощности нагрузки и зависимости КПД преобразователя от выходной мощности на скоростях  $n_n$  и  $0,1 n_n$ ; б — полосы пропускания от амплитуды входного сигнала при токе отсечки 20, 30 и 40А

## Тема 9. Промышленные роботы

### УСТРОЙСТВО РОБОТОВ

#### Состав, параметры и классификация роботов

**Состав роботов.** робот как машина состоит из двух основных частей — исполнительных систем и информационно-управляющей системы с сенсорной системой. В свою очередь исполнительные системы включают манипуляционную систему (обычно в виде механических манипуляторов) и системы передвижения, имеющиеся только у мобильных (подвижных) роботов.

**Классификация роботов по назначению.** Для того чтобы ознакомиться с характеристиками и параметрами роботов, рассмотрим их классификацию по основным показателям, которые определяют тип робота.

Первым таким показателем, в соответствии с которым все роботы делятся на наиболее крупные группы, является их назначение, т. е. область применения. Сегодня основным типом роботов по-прежнему являются *промышленные роботы* (ПР), которые предназначены для применения в промышленных отраслях народного хозяйства и составляют до 80% всего парка роботов в мире.

По типу выполняемых операций все промышленные роботы делятся на *роботов технологических*, которые выполняют основные технологические операции, и *роботов вспомогательных*, предназначенных для выполнения вспомогательных технологических операций по обслуживанию основного технологического оборудования. Технологические роботы относятся к основному технологическому оборудованию, а вспомогательные можно отнести к средствам автоматизации.

По широте перечня операций, для выполнения которых предназначен робот, различаются роботы специальные, специализированные и универсальные. *Специальные роботы* предназначены для выполнения одной конкретной технологической операции (например, сварка, нанесение покрытий, определенная сборочная операция или обслуживание определенной марки технологического оборудования). *Специализированные роботы* могут выполнять несколько однотипных операций (сборочный робот со сменными рабочими инструментами, робот для обслуживания определенного типа технологического оборудования и т. п.). *Универсальные роботы* могут выполнять различные основные и вспомогательные операции в пределах их технических возможностей. Увеличение степени универсальности робота расширяет область его возможных применений, но одновременно неизбежно сопровождается недоиспользованием этих возможностей на каждой конкретной операции, а также удорожанием робота. Оптимальными в этом отношении являются специальные роботы, но с другой стороны это предельно сужает их рынок, а, следовательно, и объем производства.

#### **Классификация роботов по показателям, определяющим их конструкцию.**

К таким показателям относятся:

- тип приводов;
- грузоподъемность;
- количество манипуляторов;
- тип и параметры их рабочей зоны;
- подвижность и способ размещения;
- исполнение по назначению.

*Приводы*, которые используются в манипуляторах и системах передвижения роботов, могут быть электрическими, гидравлическими и пневматическими. Часто их применяют в комбинации. Например, в звеньях манипулятора большой грузоподъемности уместен гидравлический привод, а в его захватном устройстве — более простой и маломощный пневматический привод.

*Грузоподъемность робота* — это грузоподъемность его манипуляторов, а для транспортного робота еще и его шасси. Грузоподъемность манипулятора определяется массой перемещаемых им объектов и в зависимости от назначения робота может составлять от единиц грамм (сверхлегкие роботы, например, применяемые в микроэлектронной промышленности) до нескольких тысяч килограмм (сверхтяжелые, например, транспортные и космические роботы).

*Количество манипуляторов* у роботов в большинстве случаев ограничено одним. Однако в зависимости от назначения существуют конструкции роботов с 2, 3 и совсем редко 4 манипуляторами. Обычно манипуляторы робота выполняют одинаковыми, но имеются конструкции роботов и с разными манипуляторами. Например, существуют промышленные роботы для обслуживания прессов холодной штамповки с двумя разными манипуляторами: один, основной, для взятия заготовки и установки ее в пресс и другой, упрощенной конструкции, для выполнения более простой операции изъятия готовой детали.

*Тип и параметры рабочей зоны манипулятора* определяют область окружающего робота пространства, в пределах которой он может осуществлять манипуляций, не передвигаясь, т. е. при неподвижном основании. Рабочая зона манипулятора — это пространство, в котором может находиться его рабочий орган при всех возможных положениях звеньев манипулятора. Форма рабочей зоны определяется системой координат, в которой осуществляется движение рабочего органа манипулятора, и числом степеней подвижности манипулятора.

*Подвижность робота* определяется наличием или отсутствием у него системы передвижения. В первом случае роботы называют *мобильными*, а во втором — *стационарными*. В соответствии с назначением роботов в них применяют системы передвижения практически всех известных на сегодня типов: от наземных (колесных, гусеничных и др.) до предназначенных для передвижения в воде, воздухе и космосе. Специфическим способом передвижения, относящимся к робототехнике, является шагание.

*По способу размещения* стационарные и мобильные роботы бывают напольными, подвесными (мобильные роботы этого типа обычно перемещаются по поднятому монорельсу) и встраиваемыми в другое оборудование (например, с размещением на станине обслуживаемого им станка).

*Исполнение робота по назначению* зависит от внешних условий, в которых он должен функционировать. Различают исполнение нормальное, пылезащитное, теплозащитное, влагозащитное, взрывобезопасное и т. д.

**Классификация роботов по способу управления.** По этому признаку различают роботы с программным, адаптивным и интеллектуальным управлением.

Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть непрерывным и дискретным. В последнем случае управление движением осуществляется заданием последовательности точек с остановкой в каждой из них. Простейшим вариантом дискретного управления является *цикловое*, при котором количество точек позиционирования по каждой степени подвижности минимально — чаще всего ограничено двумя — начальной и конечной.

**Классификация роботов по быстродействию и точности движений.** Эти параметры взаимосвязаны и характеризуют динамические свойства роботов. *Быстродействие манипулятора* определяется скоростью перемещения его рабочего органа и может быть разбито на 3 диапазона в зависимости от линейной скорости:

малое — до 0,5 м/с;

среднее — от 0,5 до 1—3 м/с;

высокое — при больших скоростях.

Наибольшая скорость манипуляторов современных роботов достигает 10 м/с и выше.

Для значительной части областей применения роботов этот параметр очень важен, так как предопределяет их производительность. Основная трудность при повышении быстродействия связана с известным противоречием между быстродействием и точностью.

*Точность манипулятора и системы передвижения робота* характеризуется погрешностью позиционирования. Чаще всего точность роботов характеризуют абсолютной погрешностью. Точность роботов общего применения можно разбить на 3 диапазона в зависимости от линейной погрешности:

малая — от 1 мм и более;

средняя — от 0,1 до 1 мм;

высокая — при меньшей погрешности.

Наименьшую точность имеют роботы, предназначенные для выполнения наиболее грубых, например, транспортных движений, а наибольшую, микронную — роботы, используемые, например, в электронной промышленности.

По сравнению с человеческой рукой существенным недостатком современных роботов пока является снижение точности с увеличением хода манипулятора, в то время как у человека эти параметры в значительной степени развязаны благодаря разделению движений на грубые (быстрые) и точные.

Рассмотренные ранее параметры роботов относятся к *классификационным*, т. е. используются при формировании типажа роботов и, соответственно, их наименований. Например, названия: легкий пневматический промышленный робот с цикловым управлением для обслуживания прессов холодной штамповки, окрасочный гидравлический промышленный робот и т. д.

**Параметры, определяющие технический уровень роботов.** К ним относятся и некоторые из ранее рассмотренных параметров, которые могут иметь количественное выражение, такие, как:

быстродействие, точность. Однако, если при использовании этих параметров для классификации роботов их разбивают, как было показано ранее, на классификационные диапазоны и тип робота определяют по принадлежности значения данного параметра к одному из них, то сравнительную оценку технического уровня роботов производят, исходя из конкретных численных значений параметров. При этом широко применяются различные, основанные на указанных ранее параметрах, комбинированные и относительные показатели. К ним относятся, в частности, удельная грузоподъемность, отнесенная к массе робота, выходная мощность манипулятора (произведение грузоподъемности на скорость перемещения), отнесенная к мощности его приводов; размер рабочей зоны, отнесенный к габаритам робота.

Другими ранее не упоминавшимися параметрами, характеризующими технический уровень роботов, являются число одновременно работающих степеней подвижности, надежность, способы и время программирования.

## Тема 10. Рабочие органы манипуляторов

Рабочие органы манипуляторов служат для непосредственного взаимодействия с объектами внешней среды и делятся на *захватные устройства* и специальный инструмент. Рабочие органы могут быть постоянными и съемными, в том числе с возможностью их автоматической замены в ходе выполнения технологической операции.

Захватные устройства. Они предназначены для того, чтобы брать объект, удерживать его в процессе манипулирования и освободить по окончании этого процесса. Существуют следующие основные типы захватных устройств: механические устройства-схваты, пневматические и электромагнитные. Кроме того, в связи с большим разнообразием объектов манипулирования разработано большое количество различных комбинаций этих типов захватных устройств и множество специальных захватных устройств, основанных на различных оригинальных принципах действия (например, клейкие захватные устройства, накалывающие, использующие аэродинамическую подъемную силу и т. п.).

*Схват* — это механическое захватное устройство, аналог кисти руки человека. Самые простые двухпальцевые схваты напоминают обычные плоскогубцы, но снабжены приводом. На рис. 3.13 показана конструкция подобного схвата с пневматическим приводом. В зависимости от объектов манипулирования применяют схваты с 3, 4 и реже с большим числом пальцев. На рис. 3.14 показан сложный схват с 3 пальцами, каждый из которых имеет по 3 подвижных звена и может также поворачиваться относительно продольной оси. Здесь использован эффект памяти формы, проиллюстрированный на рис. 3.10, б. Однако в связи с простотой совершаемых схватами движений ("зажим-разжим") в них обычно используются нерегулируемые пневматические и электрические приводы, значительно реже — гидравлические.

На рис. 3.15 показан пневматический схват с 5 гибкими надутыми пальцами. За счет разной жесткости пальцев в сечении при подаче в них сжатого воздуха они изгибаются, захватывая находящиеся в их зоне предметы.

Схваты часто очувствляют с помощью контактных датчиков, датчиков проскальзывания, усилия и дистанционных датчиков (ультразвуковых, оптических и др.), выявляющих предметы вблизи схвата и между его пальцами.

В наиболее распространенном типе вакуумного захватного устройства использованы вакуумные присоски, которые удерживают объекты за счет разрежения воздуха при его отсосе из полости между присоской и захватываемым объектом. Для захватывания объектов сложной формы применяют вакуумные захватные устройства с несколькими присосками.

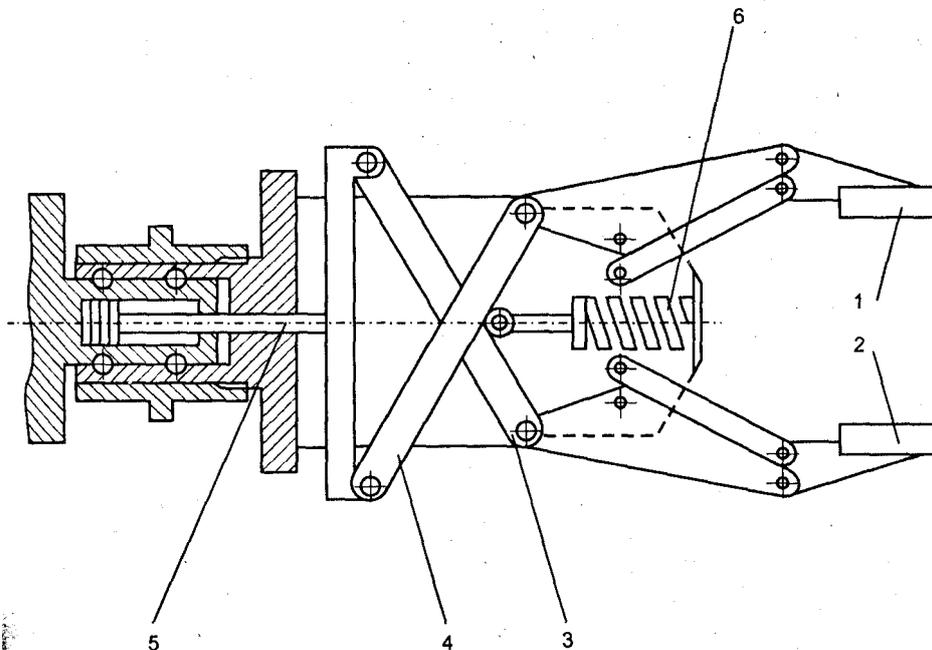


Рис. 3.13. Двухпальцевый схват: 1; 2 — пальцы (губки); 3; 4 — рычажная передача; 5 — шток пневматического двигателя (пневмоцилиндра); 6 — возвратная пружина

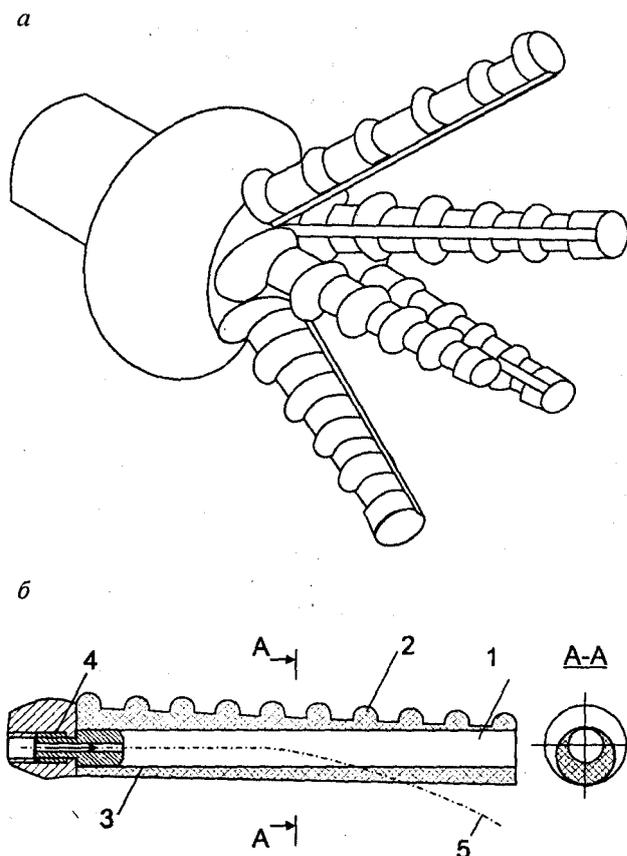


Рис. 3.15. Пневматический схват с 5 гибкими надувными пальцами:  
*a* — внешний вид; *б* — разрез пальца; 1 — тонкостенная часть;  
 2 — гофры; 3 — толстостенная часть; 4 — подвод воздуха;  
 5 — деформация оси пальца при подаче сжатого воздуха

Магнитные захватные устройства используются для взятия ферромагнитных объектов. В роботах нашли применение в основном захватные устройства с электромагнитами, но имеются устройства и с постоянными магнитами. (Для освобождения захваченного предмета они снабжены специальными механическими выталкивателями.)

Захватные устройства бывают универсальными и специальными (для работы с хрупкими и протяженными предметами, тканями и т. д.).

Захватные устройства часто присоединяют к последнему звену манипулятора через промежуточные, податливые конструктивные элементы. С их помощью осуществляется компенсация возможных неточностей позиционирования и устраняются возникающие при этом механические напряжения в звеньях манипулятора в случаях манипулирования объектами, на перемещение которых наложены механические ограничения (механическая сборка и разборка, установка заготовок в зажимы и гнезда технологического оборудования, перемещение предметов по направляющей и т. п.).

**Рабочий инструмент.** В случаях, когда объектом манипулирования является рабочий инструмент, с помощью которого робот выполняет определенные технологические операции (нанесение покрытий, сварка, завинчивание гаек, зачистка поверхностей и т. п.), этот инструмент, как правило, не берется захватным устройством, а непосредственно крепится к манипулятору вместо него. Часто при этом к инструменту необходимо обеспечить подвод энергии или какого-либо рабочего тела. Для окрасочного робота — это краска и воздух к пульверизатору, для сварочного робота — сварочный ток к сварочным клещам при точечной сварке или проволочный электрод, газ и охлаждающая вода при дуговой сварке и т. д. Для этого требуется разработка специальной конструкции всего манипулятора.

## Тема 11. ПРИВОДЫ РОБОТОВ

### Классификация приводов

Привод включает двигатель и устройство управления им. Кроме того, в состав привода могут входить различные механизмы для передачи и преобразования движения (редукторы, преобразователи вращательного движения в поступательное и наоборот), тормоз и муфта.

К приводам, применяемым в роботах, предъявляют весьма жесткие специфические требования. В связи с необходимостью встраивания приводов в исполнительные системы робота — в манипуляторы и системы передвижения — габариты и масса приводов должны быть минимальными. Приводы в роботах работают в основном в неустановившихся режимах и с переменной нагрузкой. При этом переходные процессы в них должны быть практически неколебательными. Важными параметрами приводов роботов являются также надежность, стоимость, удобство эксплуатации. Требования, предъявляемые к их способу управления, быстрдействию и точности, непосредственно определяются соответствующими требованиями к роботу в целом. В частности, обычно требуется, чтобы скорость поступательного движения на выходе приводов роботов в среднем составляла от долей до нескольких м/с при погрешности отработки перемещения, равной долям миллиметра.

В роботах нашли применение практически все известные типы приводов: электрические, гидравлические и пневматические; с поступательным и вращательным движением; регулируемые (по положению и скорости) и нерегулируемые; замкнутые (с обратной связью) и разомкнутые; непрерывного и дискретного действия (в том числе шаговые).

На рис. 11.1 приведена типовая схема привода манипулятора. Наряду с общей обратной связью по положению в схеме имеется обратная связь по скорости, которая играет роль корректирующей гибкой обратной связи и часто, кроме того, служит для управления скоростью. В тех случаях, когда механизм М является редуктором и понижает скорость, датчик скорости ставится не как показано на рисунке, а на выходе двигателя перед механизмом, чтобы увеличить снимаемый с датчика сигнал по скорости. Устройство управления может быть непрерывного действия, релейным, импульсивным или цифровым.

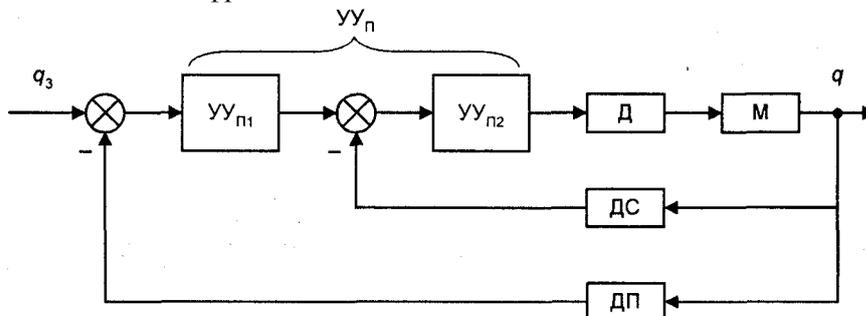


Рис. 11.1. Типовая схема позиционного привода манипуляторов:

Д — двигатель; М — механизм передачи и преобразования перемещения; ДП, ДС — датчики положения и скорости; УУ<sub>п1</sub>, УУ<sub>п2</sub> — составные части устройства управления УУ<sub>п</sub>

Применение *пневматических приводов* в робототехнике объясняется их дешевизной, простотой и соответственно надежностью. Правда, эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном как нерегулируемые с цикловым управлением. Пневматические приводы применяют только в роботах небольшой грузоподъемности — до 10 кг, реже 20 кг.

*Гидравлические приводы* наиболее сложны и дороги по сравнению с пневматическими и электрическими. Однако при мощности 500—1000 Вт и выше они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками и поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов. Гидравлические приводы хорошо управляются, поэтому они нашли также применение в роботах средней грузоподъемности, для которых требуются высококачественные динамические характеристики.

*Электрический привод*, несмотря на его хорошую управляемость, простоту подвода энергии, большой к.п.д. и удобство эксплуатации имеет худшие массогабаритные характеристики, чем пневматический и гидравлический приводы. Прогрессивное увеличение в последние годы доли электромеханических роботов в общем парке роботов в мире вызвано быстрым прогрессом в создании новых типов электрических двигателей, специально предназначенных для роботов и позволяющих создавать более компактные комплектные приводы всех требуемых типов. На сегодня основная область применения электрических приводов в робототехнике — это роботы

средней грузоподъемности (десятки килограмм), легкие роботы с высококачественным управлением и мобильные роботы.

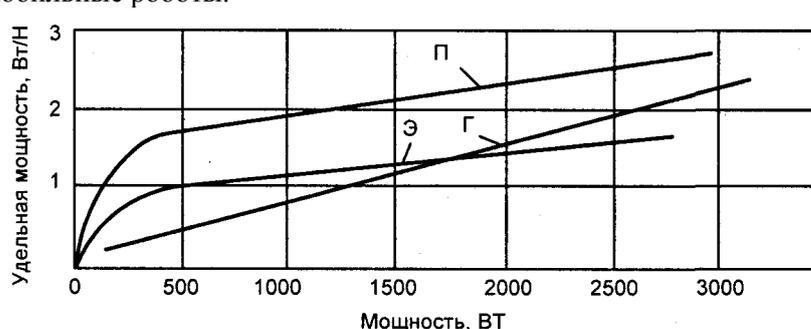


Рис. 11.2. Удельная мощность (отнесенная к весу) электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов в зависимости от их абсолютной мощности

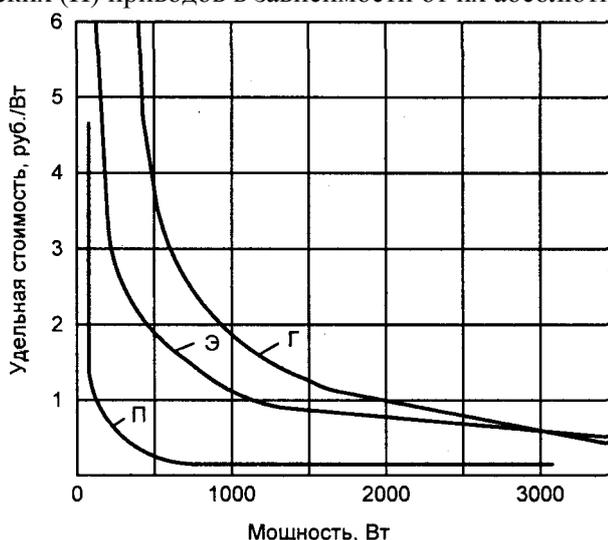


Рис. 11.3. Удельная стоимость электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов в зависимости от их мощности

Для иллюстрации сказанного на рис. 11.2 и 11.3 приведены обобщенные сравнительные характеристики различных типов приводов по удельной мощности и стоимости. При расчете удельной мощности пневмоприводов учитывалась масса аппаратуры подготовки воздуха, а гидроприводов — масса гидростанции, которые входят в конструкцию роботов.

### Пневматические приводы

В пневмопривод одной степени подвижности входят двигатель, распределительное устройство и регулятор скорости. Двигатель может быть поступательного движения — *пнеumoцилиндр* и *поворотный*. Пнеumoцилиндр состоит из гильзы, выполненной из прецизионной трубы обычно с фторопластовой накладкой внутри, поршня с уплотнением, которое имеет малое трение по фторопласту, и штока. К пнеumoцилиндру часто пристроен тормоз, включающийся в конце хода поршня. Поршень со штоком, который присоединен к нагрузке двигателя, движется под действием сжатого воздуха, подаваемого в полость цилиндра с одной стороны поршня. Полость, расположенная с другой стороны поршня, соединяется при этом с атмосферой для выпуска воздуха, сжимаемого движущимся поршнем. Направление движения поршня со штоком зависит от того, с какой стороны от поршня подается сжатый воздух.

Поворотные пневматические двигатели, применяемые в роботах, имеют ограниченный угол поворота (неполповоротные двигатели). Их подвижная часть представляет собой лопасть, укрепленную на выходном валу и расположенную в кольцеобразном корпусе. Внутри корпуса имеется перегородка, с двух сторон которой получаются полости для воздуха, разделенные подвижной лопастью.

Распределительное устройство пневмопривода служит для управления подачей воздуха в двигатель. Выполняют его из золотников или клапанов обычно с электромагнитным приводом, управляющие сигналы на которые поступают от устройства управления робота.

Регулятор скорости поддерживает заданную скорость движения привода путем стабилизации расхода воздуха, подаваемого в двигатель (например, с помощью дросселя с обратным клапаном).

Пневматические двигатели работают на сжатом воздухе давлением 0,3— 0,6 МПа. Сжатый воздух поступает на приводы от общего блока питания, который состоит из аппаратуры подготовки воздуха и редуктора. Подготовка воздуха заключается в его очистке от влаги и механических примесей и внесении распыленного масла для смазки трущихся поверхностей в двигателе. Редуктор обеспечивает поддержание определенного давления воздуха на входе привода.

Сжатый воздух на вход блока питания поступает обычно из общей пневмосети предприятия, в которую он подается от компрессора (компрессорной станции). В мобильных роботах воздух поступает из баллонов, в которых он находится под повышенным давлением.

Как было указано, в настоящее время подавляющее большинство пневмоприводов роботов имеют простейшее цикловое управление (по упорам). При таком управлении привод перемещается из начального положения сразу в конечное, которое определяется механическим упором, установленным на подвижной части привода (на штоке пневмоцилиндра или выходном валу поворотного двигателя). Упор находит на демпфер, который гасит энергию движения, обеспечивая безударное торможение привода. Одновременно с этим прекращается подача воздуха в двигатель. Демпферы в основном гидравлические, а для маломощных приводов — более простые пружинные. Прибегают также к способу торможения противодавлением, при котором демпфер не требуется, а торможение происходит за счет переключения подачи воздуха в момент торможения из одной полости двигателя в другую, выхлопную полость, т. е. встречно движению поршня (или лопасти в поворотном двигателе).

Задание величины перемещения осуществляется перестановкой упора. Благодаря тому, что конечное положение двигателя определяется механическим упором, приводы с цикловым управлением имеют значительно более высокую точность, чем при обычном позиционном управлении с обратной связью по положению (погрешность менее 0,1 мм) и повышенное быстродействие (скорость перемещения — несколько метров в секунду).

Разработаны конструкции пневмоприводов с несколькими выдвигными упорами, которые последовательно по программе выставляются на пути упора, укрепленного на подвижной части двигателя. В результате осуществляются торможение и позиционирование привода в промежуточных точках, определяемых положением этих выдвигных упоров. Такой способ позиционирования может быть реализован, например, с помощью размещенного вдоль пневмоцилиндра барабана с упорами. Упоры расположены по длине барабана со смещением относительно друг друга по углу в плоскости, перпендикулярной оси барабана, как бы по винтовой линии. В результате при повороте барабана на пути упора, перемещающегося со штоком двигателя, последовательно оказываются упоры барабана от первого до последнего. Движение барабана, естественно, должно быть синхронизировано с движением штока двигателя. Существуют также конструкции подобных приводов с выдвигными упорами, снабженными индивидуальными приводами. Минимальная дискретность при программировании точек позиционирования пневмоприводов и, соответственно, наибольшее число таких точек на заданном пути ограничены величиной пути торможения, который при скорости порядка 1 м/с может достигать 100 мм. Для повышения точности позиционирования в промежуточных точках пневмоприводы снабжают тормозом (обычно электромагнитным).

Принципиально возможное позиционирование пневмоприводов с помощью позиционного управления с обратной связью по положению из-за сжимаемости воздуха имеет значительно худшую точность, чем при использовании упоров. Пока в мире созданы всего несколько марок пневматических промышленных роботов с таким позиционным управлением.

Другим вариантом дискретного позиционного пневмопривода является дискретный привод, состоящий из последовательно соединенных цикловых пневмоприводов с различающимися (вдвое) значениями перемещения. Включая эти цикловые приводы в разной комбинации, можно получать соответственно разное суммарное перемещение из конечного числа его дискретных значений. Например, 3 таких привода дают в совокупности 8 точек позиционирования, 4 привода — 16 точек и т. д.

### **Гидравлические приводы**

Как было отмечено ранее, гидроприводы нашли основное применение в роботах большой грузоподъемности, а также в роботах средней грузоподъемности, когда требуется особо качественное управление. Гидропривод состоит из тех же основных частей, что и пневмопривод. Основой его является двигатель поступательного движения (гидроцилиндр) или углового движения (поворотный гидродвигатель), которые устроены подобно аналогичным пневматическим двигателям, только вместо сжатого воздуха в них используется жидкость (обычно

масло) под давлением до 20 МПа. Соответственно создается и на 2 порядка большее усилие. Несжимаемость жидкости обеспечивает гидроприводу значительно лучшие динамические и точностные характеристики по сравнению с пневмоприводом.

Управление гидравлическими двигателями осуществляется с помощью золотников и клапанов, которые имеют обычно электрическое управление, т.е. представляют собой электрогидравлические усилители (ЭГУ). Гидроприводы чаще всего выполняют с непрерывным управлением.

В отличие от пневмоприводов гидроприводы имеют свой блок питания, входящий в состав робота. Этот блок состоит из гидронасоса, фильтра, регулятора давления, устройства охлаждения (обычно водяного) и масляного аккумулятора с запасом масла.

### **Электрические приводы**

В промышленных роботах нашли применение электроприводы следующих типов:

- на двигателях постоянного тока традиционных коллекторных и бесколлекторных (вентильных);
- на асинхронных двигателях как нерегулируемых (с цикловым управлением), так и с частотным управлением;
- на шаговых двигателях;
- на различного типа регулируемых муфтах в сочетании с нерегулируемым асинхронным двигателем или двигателем постоянного тока;
- на электромагнитах (соленоидных и других типов).

В основном применяются традиционные электроприводы с угловым перемещением, т. е. вращающиеся. Однако в роботах с поступательными перемещениями наряду с вращающимися двигателями в комбинации с механизмами, преобразующими вращательное движение в поступательное (типа передачи шестерня-рейка и т. п.), нашли применение и специальные линейные приводы постоянного и переменного тока.

Электроприводы для роботов в общем случае включают электродвигатель, снабженный датчиками обратной связи по положению и скорости, механическую передачу, часто тормоз, иногда муфту (например, для защиты двигателя от перегрузки) и устройство управления.

К перспективным разработкам электрических приводов для роботов относятся высокомоментные безредукторные двигатели, приводы с непосредственным цифровым управлением и бездатчиковые приводы с расчетом значений перемещения и скорости по измеряемым электрическим переменным двигателя.

### **Комбинированные приводы**

Стремление максимально использовать и объединить достоинства отдельных типов приводов, а также скомпенсировать их недостатки привело к разработке и применению в роботах различных комбинированных приводов.

На рис. 11.4 показана схема комбинированного пневмогидравлического привода, в котором действующий параллельно основному исполнительному пневмоцилиндру 1 гидроцилиндр 2 обеспечивает коррекцию скорости выходного звена и его конечного положения. Воздух под давлением поступает из магистрали в одну из полостей пневмоцилиндра 1 через пневмораспределитель 7. В результате происходит перемещение поршня со штоком, скорость которого определяется настройкой гидродросселей 3. (При этом гидрораспределитель 5 находится в правом положении, соединяя обе полости гидроцилиндра.) Обратные клапаны 4 обеспечивают свободный доступ жидкости в заполняемую полость гидроцилиндра 2. Для компенсации разности объемов полостей гидроцилиндра и пополнения утечек масла в схеме предусмотрен масляный аккумулятор 6. Гидрораспределитель 5 может выполнять роль гидрозамка, фиксирующего положение манипулятора. Если в качестве дросселей 3 применены дроссели с пропорциональным электрическим управлением, то рассматриваемый привод при наличии обратной связи по положению можно использовать в роботах с позиционным управлением. Существуют аналогичные пневмоэлектрические приводы, в которых вместо гидропривода применен электропривод.

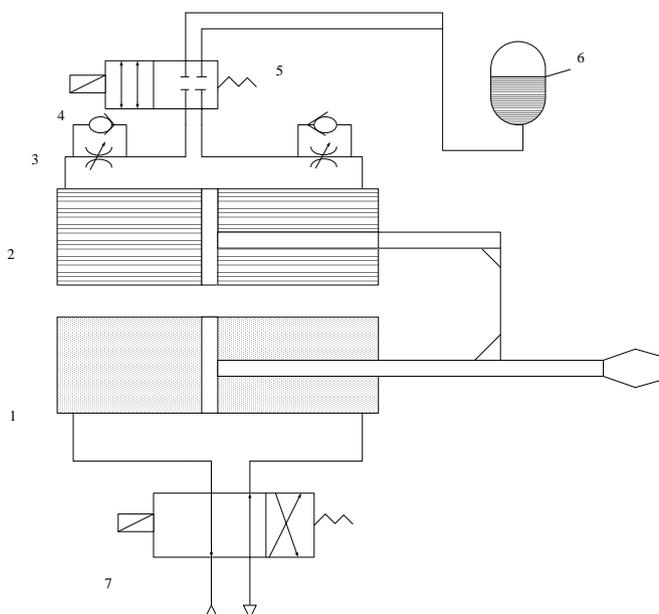


Рис. 11.4. Схема пневмогидравлического привода

На рис. 11.5 приведена принципиальная схема гидропневматического привода. Введение здесь пневмоцилиндра 1 перед основным исполнительным гидроцилиндром позволяет отказаться от гидронасосной станции. При подаче воздуха в поршневую полость пневмоцилиндра 1 создается давление в поршневой полости гидроцилиндра 2 и жидкость из нее поступает в исполнительный гидроцилиндр 3. В результате поршень его перемещается. При движении поршня пневмоцилиндра в обратном направлении соответственно изменяется направление движения поршней в гидроцилиндрах 2 и 3. Емкость 4 служит для компенсации разности объемов полостей цилиндра, а также утечки жидкости.

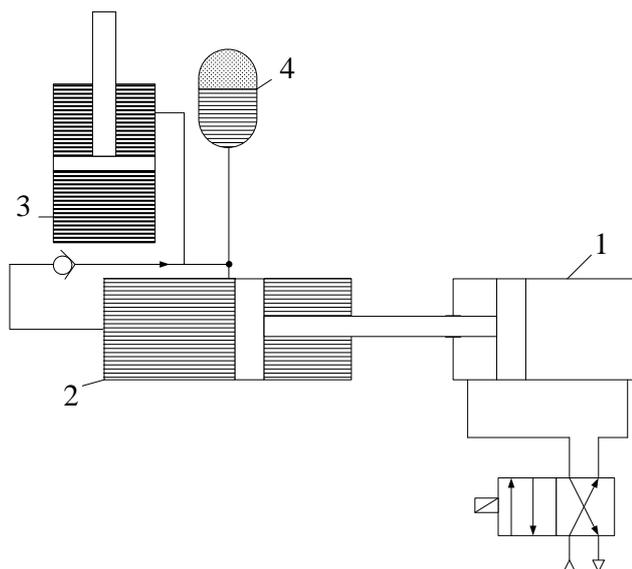


Рис. 11.5. Схема гидропневматического привода

Широкое применение нашли комбинированные гидроэлектрические приводы, в которых последовательно соединены маломощный электрический и выходной гидравлический приводы. Электропривод преобразует входной электрический сигнал в перемещение, которое служит входным управляющим воздействием для гидроусилителя гидропривода. Электрический привод может быть замкнутым следящим или разомкнутым на базе шагового двигателя.

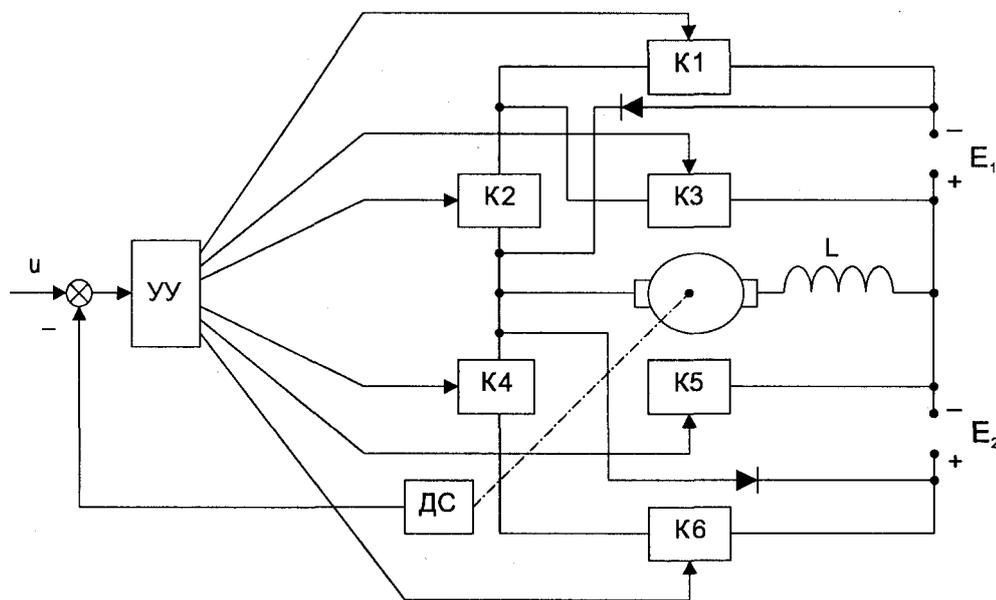
#### Рекуперация энергии в приводах

Приводы роботов работают в основном в переходных циклических режимах типа разгон-торможение. Поэтому одним из важных способов экономии энергии у них может служить использование идеи *рекуперации энергии*. Это особенно важно для мобильных роботов с автономным энергопитанием. Кроме того, при этом часто повышается и быстродействие.

Рекуперация энергии основана на ее запасании в процессе торможения и отдачи при последующем разгоне. Существуют два основных способа такого запасаания энергии: запасаание механической энергии (с помощью маховиков, пружин) и электрической (в аккумуляторах, конденсаторах, индуктивных катушках).

В отечественных цикловых промышленных роботах получил применение принцип рекуперации механической энергии с помощью пружин. Благодаря этому по своим энергетическим характеристикам они не имеют аналогов в мире. В цикловой привод введена пружина, которая обеспечивает циклическое движение манипулятора в режиме резонансных незатухающих колебаний с нулевой скоростью в крайних точках. Двигатель привода осуществляет только подпитку энергией пружины в середине пути при максимальной скорости движения, восполняя потери энергии на выполняемую приводом работу. При этом в конечных точках движения не происходит удара с бесполезным рассеянием накопленной приводом кинетической энергии. В результате в 3—4 раза снижается энергопотребление и соответственно может быть уменьшена мощность двигателя в приводе [7]. Аналогичный эффект может быть получен в приводах захватных устройств манипуляторов [8].

На рис. 11.6 приведена схема электрического привода с рекуперацией электрической энергии [9]. Энергия, которая возвращается в источники питания в режиме рекуперативного торможения, запасается в индуктивности  $L$ . Ключи  $K_2, K_4$  предназначены для реверсного управления двигателем от двухполюсного источника  $E_1, E_2$ , а ключи  $K_1, K_3, K_5, K_6$  — для осуществления режима рекуперации. В режиме движения под действием двигателя  $D$  ключи  $K_1$  и  $K_4$  замкнуты, а ключи  $K_3$  и  $K_5$  разомкнуты. Режим рекуперации включается при торможении, когда знаки производной от заданной скорости и скорости двигателя разные. Для этого устройство управления размыкает ключи  $K_1$  и  $K_6$ , замыкает  $K_3, K_5$  и инвертирует  $K_2$  и  $K_4$ . Аналогичные схемы разработаны с использованием в качестве накопителей энергии конденсаторов.



**Рис. 4.15.** Схема системы управления приводом мобильного робота с рекуперацией энергии:  $D$  — двигатель;  $E_1, E_2$  — источники напряжения постоянного тока;  $УУ$  — устройство управления;  $ДС$  — датчик скорости;  $K$  — ключи;  $L$  — индуктивность

### Искусственные мышцы

Важным бионическим направлением в робототехнике является создание приводов типа искусственная (техническая) мышца. Современные приводы, в том числе и применяемые в робототехнике, по своим массогабаритным параметрам на порядок уступают поперечно-полосатым мышцам животных и человека. То, что параметры приводов в значительной степени определяют массогабаритные и энергетические характеристики роботов в целом, определяет интерес к проблеме создания технических аналогов таких мышц.

Одна из очевидных причин значительно большей массы у современных приводов по сравнению с мышцами — наличие в них металлов, особенно ферромагнитных в электрических двигателях.

Поэтому первыми разработками приводов, получивших название искусственная мышца, были пневматические приводы, в которых цилиндр с поршнем заменялся эластичной трубкой (резина, полимеры) в оплетке крест-накрест (нейлон).

При подаче в трубку воздуха под давлением она, раздуваясь, сокращается до 1/3 длины, имитируя работу мышцы. Такие приводы имеют в 3—4 раза меньшую массу, чем пневматические цилиндры той же мощности, и поэтому они нашли применение, в частности, при протезировании конечностей. Источником сжатого газа при этом служат обычно одноразовые баллончики.

На рис. 4.16 показано устройство реверсивного привода такого типа, примененного в промышленном роботе "Софтарт" фирмы "Бридж-стоун" (Япония).

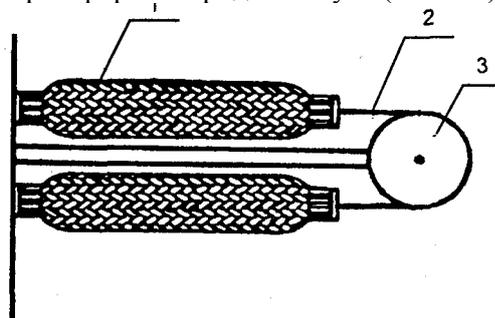


Рис. 11.7. Реверсивный гибкий пневматический привод фирмы "Бриджестоун":

1 — гибкий пневматический привод; 2 — трос; 3 — блок

Устройство состоит из 2 пневматических приводов одностороннего действия. При повышении давления в одном из них и одновременном понижении на ту же величину в другом первый привод сокращается, удлиняя второй. В результате через трос происходит поворот блока, который связан со звеном манипулятора. Угол поворота блока практически прямо пропорционален разности давлений в приводах. Грузоподъемность шарнирного манипулятора с 5 степенями подвижности робота "Софтарт" — 3 кг при массе 5,5 кг. Погрешность позиционирования — 1,5 мм.

На рис. 11.8 показан вариант пневматической искусственной мышцы, в которой газ под давлением получается непосредственно в самой трубке в результате нагрева электрическим током [10]. При прохождении электрического тока по термоэлементу 3 специальный наполнитель 4 нагревается и выделяет газ. В результате внутри трубки повышается давление и она, раздуваясь, сокращается в длину. После отключения тока наполнитель охлаждается, вновь поглощая выделившийся газ, и мышца приходит в исходное состояние.

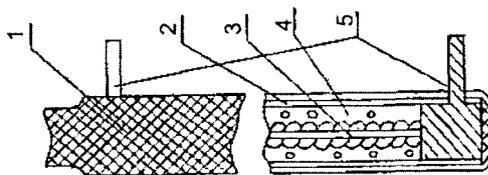


Рис. 11.8. Сорбционная искусственная мышца: 1 — кордовая оболочка; 2 — эластичная трубка;

3 — термоэлемент; 4 — наполнитель; 5 — электрические выводы

Длина мышцы — 150—300 мм, диаметр 3—5 мм. Величина сокращения — 10—15%. Развиваемое усилие — 1—3 Н, при массе мышцы — единицы граммов. Главный недостаток этой мышцы — очень низкое быстродействие: время сжатия больше 30 с, а обратного расслабления еще в 2—3 раза больше. Другой вариант подобной пневматической мышцы с тепловым воздействием — заполнение трубки легкокипящей жидкостью с воздействием на нее внешним источником тепла.

Разновидностью пневматических искусственных мышц являются аналогичные устройства с заменой оплетки продольными тяговыми нитями. Такие конструкции имеют лучшие тяговые характеристики и развивают большие усилия. Еще большие тяговые усилия можно получить при замене газа жидкостью под давлением, т. е. при переходе к гидравлическим искусственным мышцам. Кроме того, такие гидравлические искусственные мышцы обладают более высокой точностью позиционирования и лучшей динамикой, как все гидравлические приводы по сравнению с пневматическими.

Наряду с описанными пневматическими и гидравлическими приводами типа искусственной мышцы существуют близкие им эластичные приводы, в которых работа совершается за счет изгибных деформаций эластичных полостей. Однако поскольку в этом случае используется деформация не сжатия как у мышц, а изгиба, эти приводы формально не относятся к искусственным мышцам. В среднем описанные пневматические и гидравлические искусственные

мышцы по сравнению с аналогичными традиционными приводами (цилиндрами) в 3 раза легче, в 2 раза меньше по габаритам и развивают в десятки раз большее усилие на единицу веса.

Кроме реализованных в конкретных конструкциях типов пневматических и гидравлических искусственных мышц в мире ведутся интенсивные исследования и разработки искусственных мышц, основанных на других физических принципах. Наиболее близки к рассмотренным устройствам разработки электромагнитных и электростатических искусственных мышц.

Электромагнитная искусственная мышца состоит из многовитковой обмотки, сжатой в жгут, в котором проводники с электрическим током противоположного направления прижаты друг к другу. При пропускании по ним тока они вследствие электромагнитного силового взаимодействия расходятся в поперечном направлении. В результате длина жгута сокращается подобно описанному ранее сокращению пневматических и гидравлических мышц.

Один из первых вариантов электростатической искусственной мышцы представляет собой цилиндр, по оси которого расположен центральный электрод, а по образующим цилиндра — соединенные друг с другом гибкие периферийные электроды. При подаче на центральный и периферийный электроды электрического потенциала возникает электрическая сила, которая отталкивает периферийные электроды от центрального. В результате периферийные электроды изгибаются, вызывая сокращение мышцы. Другой вариант электростатической мышцы выполнен в виде столбика, собранного из тонких металлических дисков (пленок), разделенных упругими изолирующими прокладками. Все нечетные и все четные диски соединены друг с другом. При подаче на них электрического напряжения разной полярности диски сближаются, сжимая изолирующие прокладки, и мышца сокращается. Вместо изолирующих прокладок может быть использован газ.

В последнее время значительные успехи достигнуты в разработке электростатических искусственных мышц из полимеров, деформирующихся в электрическом поле. Так, силиконовые и акриловые пластины толщиной в десятки мкм под действием напряжения в несколько кВ расширяются перпендикулярно полю более чем вдвое, создавая усилия в десятки н. Линейный привод типа искусственная мышца, выполненный из такой пленки, покрытый с двух сторон эластичными электродами, представляет собой цилиндрическую пружину, покрытую этой пленкой. При приложении к пленке электрического напряжения цилиндр удлиняется.

Аналогичные приводы создаются и на основе ионных полимеров и полимерно-металлических композитных материалов. В электрическом поле молекулы этих материалов ионизируются и испытывают механические силы, которые вызывают деформацию материала в направлении, перпендикулярном градиенту электрического поля. На этом принципе был основан, в частности, пятипальцевый хват для манипуляторов [11].

Разрабатываются также искусственные мышцы на базе различных искусственных волокон, деформируемых под действием химических реагентов. Для всех них характерным является низкое быстродействие (секунды) и величины хода (деформации) порядка 10—15%. Общим достоинством всех предложенных приводов типа искусственная мышца являются в несколько раз лучшие массогабаритные параметры по сравнению с традиционными приводами.

### **Микроприводы**

Развитие микроробототехники в первую очередь потребовало создания соответствующих микроприводов. Для этого наряду с традиционными принципами действия и конструкциями, созданными в рамках традиционного точного машиностроения, были разработаны совершенно новые приводы для микроперемещений, основанные на использовании управляемых гибких деформаций. Одним из таких перспективных типов микроприводов являются *пьезоприводы*. На рис. 11.9, *а* показана схема основного элемента такого привода — пьезопреобразователя электрической энергии в энергию механического перемещения. Он представляет собой пакет из пьезокерамических шайб 1 с нанесенными на торцы серебряными электродами, на которые параллельно подается электрическое напряжение. При этом за счет обратного пьезоэлектрического эффекта происходит увеличение или уменьшение толщины шайб в зависимости от полярности приложенного напряжения. На рис. 11.9, *б* показан другой тип таких преобразователей, основанный на изгибных деформациях многослойных пластин из пьезоэлектрических и пассивных металлических или полимерных слоев. Такие преобразователи имеют больший ход, чем использующие деформацию расширение-сжатие, но худшие точностные и силовые параметры.

Величина перемещения на выходе таких электромеханических преобразователей (ход) — до десятых долей мм; скорость — до 1—2 м/с, погрешность управляемого позиционирования — доли

мкм, усилие— сотни Н, мощность — десятки Вт. Из таких преобразователей создаются трехстепенные микроманипуляционные системы. Они часто комбинируются с обычными электромеханическими манипуляционными системами, обеспечивающими перемещение в десятки мм с погрешностью, перекрываемой микроманипуляционной системой. Получается манипулятор, состоящий из последовательно соединенных систем грубого и точного позиционирования, рабочий ход которого определяется первой системой, а точность — второй.

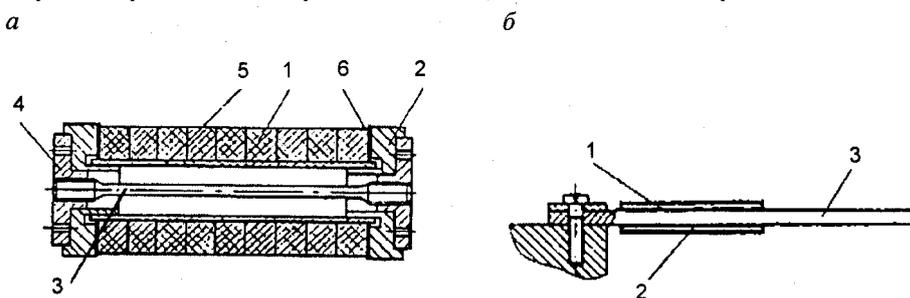


Рис. 11.9. Пьезоэлектрические преобразователи микроприводов:

- а* — с поступательной деформацией растяжение-сжатие: 1 — секция пьезокерамических шайб, 2 — фланец, 3 — шпилька, 4 — гайка, 5 — пластмассовая втулка, 6 — слюдяная шайба;  
*б* — с изгибной деформацией: 1, 2 — пьезоэлектрические пластины, 3 — металлическая рессора

Помимо пьезоэлектрических существуют микроприводы и других типов — пьезомагнитные, электро- и магнитострикционные, биметаллические, на эффекте памяти формы, электростатические, пневматические, гидравлические.

Для мобильных микророботов, предназначенных для передвижения в узких полостях (тонкие трубопроводы, желудочно-кишечный тракт, кровеносные сосуды человека и т. п.), разработаны специальные микродвижители, реализующие способ передвижения, подобный используемому гусеницами и червями. Вариант такой системы передвижения на пьезоприводах состоит из нескольких пьезоэлектрических сегментов, соединенных центральным стержнем из того же материала. Парно расширяющиеся за счет пьезоэффекта сегменты выполняют функции фиксаторов, а поступательное перемещение осуществляется путем удлинения центрального стержня. Частота импульсов движения — 10—20 МГц.

Существуют аналогичные системы, основанные на пневматике. На переднем и заднем концах такого микроробота имеются пневмофиксаторы, которые попеременно закрепляются на стенках полости. При этом корпус робота также попеременно удлиняется при закрепленном заднем и сокращается при закрепленном переднем конце. Для передвижения подобных роботов используется и управляемое внешнее силовое магнитное поле.

Основные уже определившиеся области применения микроприводов и основанных на них микроманипуляторов и микророботов — это микрооперации в промышленности (микрообработка, сборка, сварка и т. п.), биологические и фармакологические технологии, медицина (осмотр внутренностей, доставка туда лекарств, хирургические операции).

## Тема 12. СТРУКТУРНЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРЫ

Наглядное представление о манипуляторе ПР и возможностях его движений дает структурная схема. На структурной схеме условными обозначениями показаны стойка (неподвижное основание), подвижные звенья, кинематические пары с указанием их вида и взаимного расположения. Схема изображает как бы скелет механизма. Со структурной схемы обычно начинается проектирование механизма манипулятора ПР. Но схема нужна не только проектировщикам. При выборе ПР по чертежам или образцам важно увидеть схему в готовой конструкции. Именно по схеме строятся эскизы расстановки оборудования.

В механизмах манипуляторов используются практически только одноподвижные кинематические пары: *поступательные {линейные}* и *вращательные {поворотные}*. В дальнейшем на схемах они изображаются так, как это показано на рис. 12.1, а, б, соответственно. Каждой степени подвижности при этом соответствует одна кинематическая пара. Как отмечалось ранее, степени подвижности исполнительных устройств ПР делятся на три группы: межпозиционные, переносные и ориентирующие. *Межпозиционную степень подвижности* обычно реализует устройство передвижения типа тележки, перемещающейся по рельсовому пути по полу или по ригелю портала; диапазон перемещений при этом составляет несколько метров. Если ПР имеет устройство передвижения, то оно обычно имеет одну степень подвижности (поступательную).

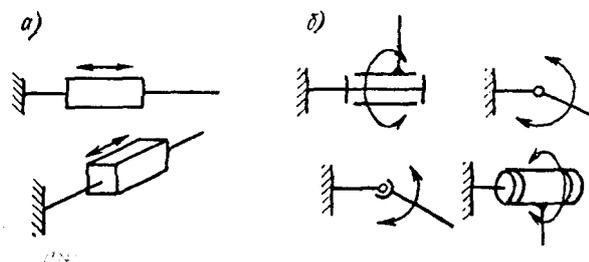


Рис. 12.1

*Переносные и ориентирующие степени подвижности* реализуются в манипуляторе. Кинематические пары переносных степеней подвижности могут быть поступательными или вращательными, соответствующие линейные перемещения обычно составляют от 0,2 до 1,5 м. Кинематические пары ориентирующих степеней подвижности обязательно являются вращательными. Разделение степеней подвижности на ориентирующие и переносные иногда является условным, поскольку при вращательных переносных движениях одновременно изменяется и ориентация.

Степени подвижности удобно рассматривать по группам: отдельно переносные и отдельно ориентирующие. Когда рассматриваются только переносные степени подвижности, переносимый объект можно считать точкой. Общий вид манипулятора и его возможности определяются переносными степенями подвижности, поэтому сначала будем учитывать только их. При классификации схем важным показателем является число степеней подвижности, вид кинематических пар и расположение их осей относительно друг друга и определенных направлений.

Ориентацию осей кинематических пар будем определять в определенном образом выбранной прямоугольной системе координат. Ось  $z$  направлена по вертикали вверх. Направления осей  $x$  и  $y$ , лежащих в горизонтальной плоскости, могут иногда быть произвольными, но обычно их связывают с расстановкой обслуживаемого оборудования или с характерными плоскостями самого механизма манипулятора. Если механизм манипулятора, как это часто бывает, имеет вертикальную плоскость симметрии, то ось  $x$  направляется именно в этой плоскости; тогда ось  $y$  по смыслу является боковой. Если можно считать условно заданной лицевую вертикальную плоскость обслуживаемого оборудования, то ось  $x$  задается перпендикулярно к ней; ось  $y$  при этом также является боковой.

Далее каждая схема будет иметь свое буквенно-цифровое обозначение. Каждая кинематическая пара будет обозначаться тремя символами: номером пары, буквой П или В (П означает, что пара поступательная, В — вращательная) и буквой  $x$ ,  $y$  или  $z$ , показывающей, по какой из осей направлена ось кинематической пары.

Для рассматриваемой схемы такие буквенно-цифровые обозначения кинематических пар

выписываются друг за другом, начиная от стойки (неподвижного основания). Как отмечалось ранее, обычно отдельно рассматриваются схемы только для переносных степеней подвижности, но иногда в схему включают также и межпозиционную степень подвижности.

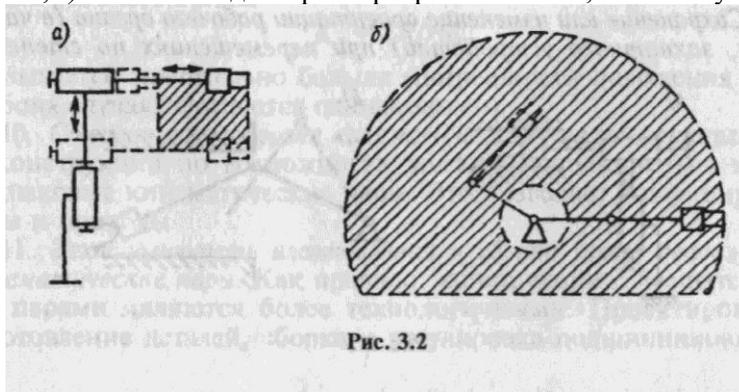
Манипуляторы всех известных промышленных роботов имеют не менее двух переносных степеней подвижности, подробные классификации построены для случаев двух или трех переносных степеней подвижности. Все возможные варианты схем можно получить, перебирая их в определенном порядке, по определенному правилу, однако далее рассматриваются в основном только те схемы, которые представляют практический интерес и нашли достаточно широкое применение.

### КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ

Главными критериями сравнения кинематических схем являются их достоинства и недостатки. Ниже перечислены факторы, которые следует учитывать при сравнении схем самих по себе и конструкций, выполняемых по этим схемам.

1. *Степень распространенности и «привычности» схем в ПР и в другом оборудовании.* Предпочтение следует отдавать тем схемам, которые нашли широкое применение и хорошо зарекомендовали себя. Однако иногда традиционные схемы могут оказаться устаревшими.

2. *Размеры и объем рабочей зоны при заданной ограниченной длине звеньев.* Преимущества имеют схемы с вращательными кинематическими парами. Это наглядно показано на рис. 3.2, а, б: при одинаковой длине звеньев размер рабочей зоны на второй схеме (рис. 3.2, б) в четыре раза больше, чем на первой (рис. 3.2, а). Если же заданы размеры рабочей зоны, то манипулятор



с вращательными кинематическими парами оказывается более компактным.

3. *Размеры и объем рабочего пространства, т. е. пространства, в которое могут попасть подвижные части механизма.* Для схемы с вращательными кинематическими парами рабочее пространство практически совпадает с рабочей зоной. Для схемы с поступательными парами рабочее пространство значительно больше, чем рабочая зона. Схемы с вращательными парами дают экономию рабочего пространства.

4. *Общий вид зоны, которая при выполнении основного рабочего движения должна оставаться свободной, препятствия в этой зоне должны отсутствовать.* При поступательном прямолинейном движении звена (руки) должен оставаться свободным узкий коридор (рис. 3.3, а), при повороте — гораздо более широкая зона (рис. 3.3, б). Поэтому в тех случаях, когда необходимо обслуживать оборудование с узкой рабочей зоной (прессы, печи), преимущества имеют схемы, по крайней мере, с одной поступательной степенью подвижности (с выдвигной рукой).

5. *Размер площади, занимаемой основанием манипулятора на полу (если ПР напольный).* Основание манипулятора может иметь меньшую площадь, если первой является кинематическая пара (поступательная или вращательная) с осью, направленной по оси  $z$ . Если ПР является подвесным, то указанный фактор не имеет значения.

6. *Вид траекторий перемещаемого объекта при движении по каждой из степеней подвижности.* Предпочтительными являются прямолинейные траектории (например, при установке заготовки в патрон станка, при взятии детали из гнезда тары, при автоматической сборке), которые образуются при поступательных кинематических парах.

7. *Простота программирования движений рабочих органов технологических ПР.* Известно, что проще всего программирование осуществляется в прямоугольных координатах, т. е. для ПР со всеми поступательными степенями подвижности. Именно такую кинематику обычно имеет традиционное технологическое оборудование (станки).

8. Сохранение или изменение ориентации рабочего органа (в частности, захватного устройства) при перемещениях по степеням подвижности.

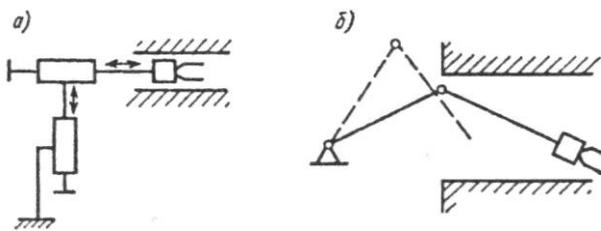


Рис. 3.3

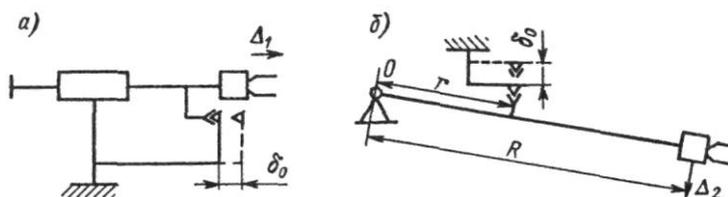


Рис. 3.4

При каких-либо перемещениях желательно, чтобы ориентация рабочего органа оставалась неизменной, т. е. чтобы рабочий орган перемещался параллельно самому себе. Если это не обеспечивается, то механизмы ориентирующих степеней подвижности (которые пока не рассматриваются), должны задавать компенсирующие повороты (на ту же величину в противоположную сторону). Сохранение ориентации при любых переносных движениях имеет место только тогда, когда все степени подвижности — поступательные. Чем больше вращательных степеней подвижности, тем большее число ориентирующих степеней подвижности должно принимать участие в осуществлении компенсирующих вращений. Однако применение параллелограммных шарнирно-рычажных механизмов типа пантографа позволяет сохранять ориентацию рабочих органов при их перемещении.

9. Погрешность положения рабочего органа, обусловленная погрешностью путевого датчика, упора или измерительного преобразователя. Как правило, поступательные пары дают погрешности положения рабочего органа на порядок меньше, чем вращательные пары. Объясняется это следующим образом. Пусть  $\delta_0$  — погрешность путевого упора. Тогда для поступательной степени подвижности погрешность положения рабочего органа  $\Delta_1 = \delta_0$  (рис. 3.4, а, б). Для вращательной степени подвижности расстояние  $r$  упора до точки поворота  $O$  значительно меньше расстояния  $R$  рабочего органа до точки поворота. Поэтому погрешность положения рабочего органа

$$\Delta_2 = (R/r)\delta_0$$

оказывается значительно больше (погрешности положения упора в обоих случаях считаются одинаковыми).

10. Степень разнообразия кинематических пар по манипулятору. В конструкции по возможности должны использоваться только одинаковые кинематические пары. Это позволяет унифицировать узлы и приводы.

11. Технологичность изготовления и сборки узлов, реализующих кинематические пары. Как правило, конструкции с вращательными парами являются более технологичными. Проектирование, изготовление деталей, сборка и регулировка подшипниковых узлов значительно проще, чем направляющих с подвижными каретками.

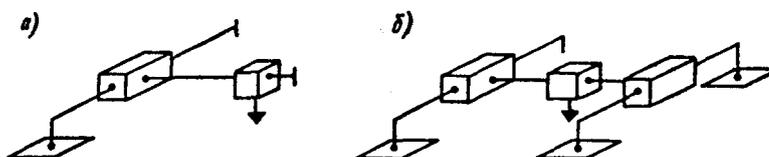


Рис. 3.5

12. Возможность построения вариантов как с нижним расположением (напольных), так и с верхним расположением (подвесных) манипуляторов. Иногда требуется установка манипулятора на вертикальной плоскости. Такое разнообразие допускают не все схемы.

13. *Возможность ужесточения конструкций путем замены консолей двухопорными элементами.* Для поступательных степеней подвижности это, как правило, легко выполнимо (рис. 3.5, а, б). Для вращательных степеней подвижности устранение консолей возможно только в некоторых случаях.

14. *Массогабаритные характеристики.* Конструкции манипуляторов с поступательными кинематическими парами обычно более громоздки и тяжелые, чем конструкции с вращательными парами.

15. *Степень согласованности с двигателями, приводящими в движение звенья.* Предпочтительной является прямая передача, когда перемещаемое звено жестко связано с выходным звеном двигателя (например, когда выдвигная рука представляет собой шток пневмоцилиндра или качающееся звено поворачивается от поворотного гидродвигателя, находящегося на том же валу). Однако часто необходимы механизмы передач. Наиболее распространенные из передач кратко рассмотрены в § 6.2, там же проведен анализ их достоинств и недостатков.

16. *Значения мощности или работы сил или моментов сил трения.* Эти значения обычно малы, но все же следует иметь в виду, что при одинаковых линейных перемещениях расходуемая мощность или работа вращательных пар обычно оказывается меньше, чем поступательных.

17. *Соотношение между суммарными массами подвижных частей, участвующих в различных движениях.* Желательно, чтобы в более точных движениях (например, при введении заготовки в рабочую зону станка, при установке заготовки в патрон и т. д.), а также в перемещениях на большие расстояния (т. е. в перемещениях по степеням свободы с большими ходами) участвовали меньшие массы.

18. *Порядковое место в кинематической цепи поступательных пар с вертикальной осью и вращательных пар с горизонтальной осью.*

Желательно, чтобы эти пары были возможно ближе к концу цепи. Это объясняется тем, что для пар указанного типа сила тяжести создает дополнительные нагрузки, поскольку при таких движениях происходят вертикальные перемещения. Заметим, однако, что уравнивание звеньев, если оно возможно, отчасти устраняет влияние этого фактора.

19. *Возможность разгрузки, статического и динамического уравнивания механизма манипулятора в целом и его отдельных частей.* Средства разгрузки и уравнивания могут быть пассивными (противовесы, пружины) и активными (пневмоцилиндры, специальные электромагнитные устройства). Для поступательных пар уравнивание осуществляется проще и более точно.

20. *Возможности объединения в одном узле механизмов двух или более степеней подвижности.* Наиболее удобным является объединение в одном узле поступательной и вращательной кинематических пар с одной и той же осью.

21. *Возможность защиты подвижных соединений звеньев от пыли, влаги, рабочих жидкостей и пр.* Защита осуществляется с помощью крышек, кожухов и т. д. Для узлов с вращательными парами эти средства более просты и надежны.

Учитывая перечисленные обстоятельства, попытаемся сравнить наиболее распространенные схемы и оценить их применение в ПР различного назначения.

### **СХЕМЫ МАНИПУЛЯТОРОВ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ ПОДВИЖНОСТИ**

При двух переносных степенях подвижности рабочий орган манипулятора может перемещаться только по определенной поверхности (в частном случае — по плоскости). Конкретный вид этой поверхности особенно важен для технологических ПР, у которых траектория рабочего органа должна покрывать участки поверхностей обрабатываемого изделия. Для вспомогательных ПР важно обеспечить возможность переноса объекта из одной точки в другую, а по какой поверхности перемещается захватное устройство, — не является существенным.

Рассмотрим сначала схему *Шу2Пх* с двумя поступательными кинематическими парами, оси которых горизонтальны (рис. 3.6, а). Эта схема характерна для различных технологических установок и станков для обработки плоских поверхностей (например, для нанесения покрытий), а также для двухкоординатных станков, графопостроителей, устройств более сложных по кинематике машин. По этой схеме выполняются конструкции манипуляторов технологических ПР, предназначенных для резки (газовой, плазменной, лазерной) плоских листов, раскроя, окраски плоских поверхностей, измерения или контроля параметров отклонения от плоскостности. Рабочая зона представляет собой плоский прямоугольник. Схема реализует плоскую прямоугольную систему координат, программирование движений в которой удобнее всего. Поскольку кинематические пары являются поступательными, схема дает возможность добиться высокой точности. Повышение жесткости обеспечивается заменой консолей двухопорными элементами (рис.

3.6, б). Однако в целом эта конструкция является громоздкой, вызывает трудности защита направляющих и элементов передач (это особенно важно, если ПР — окрасочный). Большинство ПР с такой схемой имеет электропривод, причем передача движения от вала электродвигателя осуществляется с помощью винтовой передачи (ходовой винт — гайка).

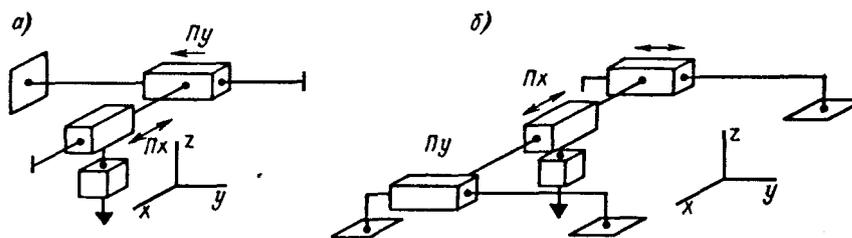


Рис. 3.6

Схема вида  $IIIy2ITz$  получается из предыдущей поворотом плоскости, которая была горизонтальной, в вертикальное положение. Манипулятор с такой схемой занимает меньше площади. Однако такое положение рабочей плоскости допустимо не для всех технологических процессов. Привод, который осуществляет вертикальное перемещение, находится в более тяжелых условиях. Чтобы уменьшить нагрузку на этот двигатель, используют противовес (рис. 3.7, а), который увеличивает массу подвижной части. Очень близкой по свойствам является схема  $IIIz2Ily$  (рис. 3.7, б). Здесь для уравнивания используют два противовеса. При выборе между двумя последними схемами в первую очередь принимается во внимание то, по какой из координат необходимо иметь большие перемещения рабочего органа. Предпочтительно, чтобы больший ход имел место по первой из степеней подвижности. Поэтому схема на рис. 3.7, а приспособлена для тех случаев, когда требуется большой горизонтальный ход; при этом горизонтальные направляющие могут крепиться на специальной неподвижной несущей конструкции.

Схема  $IIIy3Iz$  используется также в манипуляторах вспомогательных роботов-перекладчиков. При этом выдвигающая рука, перемещающаяся вертикально, обычно является консольной, верхняя балка, по которой происходит горизонтальное перемещение, может быть двухопорной или консольной (рис. 3.7, в).

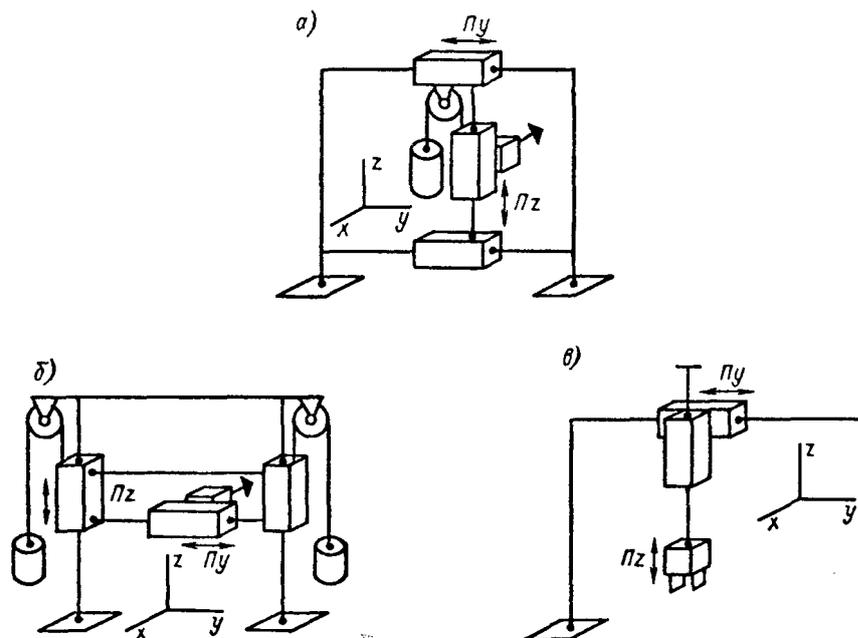


Рис. 3.7

Рассмотрим теперь схему  $IBz2ITx$  (рис. 3.8, а) с одной вращательной и одной поступательной кинематическими парами. Рабочая зона в этом случае представляет собой плоское кольцо, схема реализует плоскую полярную систему координат. Как и предыдущие схемы, она применяется в основном для манипуляторов технологических ПР, работающих с плоскими поверхностями. Из-за наличия вращательной пары точность схемы несколько ниже, чем предыдущих, причем точность может существенно изменяться при радиальном смещении рабочего органа. Конструкция, выполненная по такой схеме, не обладает большой жесткостью, поэтому существенными

становятся упругие деформации. Вертикальные перемещения подвижных частей отсутствуют, поэтому силы тяжести не нагружают двигатели. Однако значения изгибающих моментов для вертикального вала вращательной пары могут быть значительными, поскольку уравновешивание вращающейся части практически невозможно.

Схема  $1T1x2Bz$  (рис. 3.8, б) отличается от предыдущей порядком следования кинематических пар. При достаточно больших поступательных перемещениях рабочая зона представляет собой плоскую полосу. Схема имеет преимущества в тех случаях, когда требуется большой ход по оси  $x$ ; при этом балка, по которой осуществляется поступательное перемещение, выполняется двухопорной. Вращающееся звено может быть легко уравновешено специальным противовесом или перераспределением масс. Из трех схем с поступательной и с вращательной парами и с вертикальной рабочей плоскостью преимущества имеет схема  $Шу2Bx$  (рис. 3.8, в), поскольку направляющая большого поступательного перемещения неподвижна и горизонтальна, а вращающаяся часть может быть уравновешена.

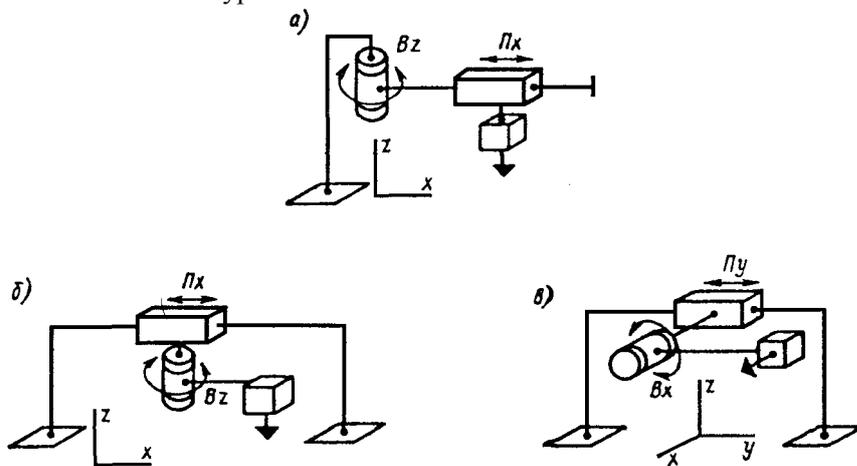


Рис. 3.8

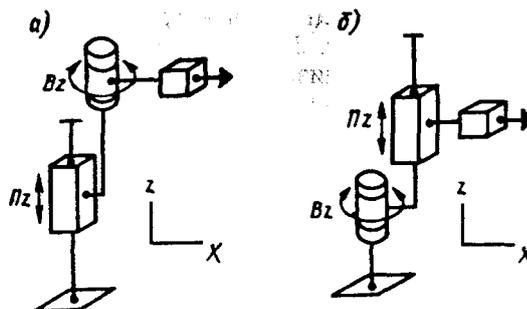


Рис. 3.9

Для вспомогательных ПР последние схемы практически не применяются.

Для схемы  $1Tz2Bz$  (рис. 3.9, а) рабочая зона представляет собой цилиндрическую поверхность определенного радиуса. Такие схемы могут использоваться в конструкциях технологических ПР только в тех случаях, когда они являются специальными (например, предназначены для внутренней обработки труб постоянного диаметра). В то же время схема широко используется в манипуляторах простейших роботов-перекладчиков. Как отмечалось ранее, сочетание вращательной и поступательной пар в одном узле дает конструктивные преимущества. Однако более подходящей является схема  $1Bz2Tz$  (рис. 3.9, б). Здесь вертикальное перемещение, наиболее ответственное, совершается по второй степени подвижности и с меньшей массой.

Схема  $1Bz2Bz$  (рис. 3.10, а) имеет две вращательные пары с параллельными осями, рабочая зона представляет собой плоское кольцо. Конструкции, выполняемые по этой схеме, технологичны. Если приводы электрические, для передач могут использоваться обычные редукторы. Двигатели и редукторы могут быть одинаковыми для обоих приводов, что является дополнительным преимуществом. Конструкции получаются более компактными и легкими по сравнению с предыдущими. Кажется, что при двух

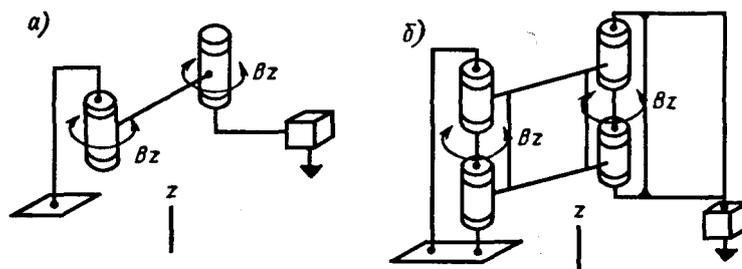


Рис. 3.10

консольных звеньях конструкция обязательно имеет низкую жесткость. Однако жесткость можно значительно повысить путем разнесения подшипников по оси  $z$  (рис. 3.10, б). В таком варианте схема используется в самых точных манипуляторах. Программирование движений в биполярной системе координат, соответствующей рассматриваемой схеме, представляет определенные трудности, так как любые прямолинейные движения рабочего органа требуют совместной работы обоих приводов.

Данную схему целесообразно применять в технологических ПР (например, окрасочных). При этом наличие только вращательных пар облегчает защиту соединений от распыленной краски. Заметим, что двухзвенный механизм рассматриваемого вида с вертикальными осями пар входит в виде складной руки в состав более сложного механизма манипулятора. Поворот плоскости механизма из горизонтального положения в вертикальное почти никакой специфики не вносит, уравнивание проще всего достигается с помощью противовесов или перераспределения массы. Такой ПР может быть выполнен как переключатель, но непрямолинейность движений захватного устройства при включении приводов по отдельности сильно ограничивает возможности его применения.

В целом следует отметить, что манипуляторы с двумя степенями подвижности встречаются преимущественно в автооператорах и специальных ПР с ограниченными возможностями. Однако на их основе могут создаваться и более сложные механизмы.

#### СХЕМЫ ОРИЕНТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрим теперь схемы механизмов ориентирования, которые имеют только вращательные кинематические пары. Положение их осей определяется относительно продольной оси  $u$  последнего звена, задающего переносное движение (руки). Вторая ось  $v$  выбирается горизонтальной, она является боковой; если механизм манипулятора имеет вертикальную плоскость симметрии, то эта ось перпендикулярна к плоскости симметрии. Третья ось  $w$  лежит в плоскости симметрии; если рука горизонтальна, то ось  $w$  вертикальна (рис. 3.19).

Буквенно-цифровые обозначения схем механизмов ориентирования аналогичны ранее введенным обозначениям схем переносных степеней подвижности: последовательно, начиная от руки, для очередной кинематической пары выписывается ее номер, обозначение ее вида (всегда  $B$ ) и обозначение оси ( $u$ ,  $v$  или  $w$ ).

При сравнении схем следует учитывать некоторые из факторов, перечисленные в § 3.2. Это «привычность» схемы, простота программирования часто встречающихся движений, технологичность изготовления и сборки узлов, возможности замены консолей двухопорными элементами, массогабаритные характеристики, возможность простого и удобного объединения в одном узле двух или трех ориентирующих или одновременно ориентирующих и переносных степеней подвижности. Помимо этого дополнительно следует учитывать следующие факторы.

1. *Приспособленность к простейшим задачам переориентирования.* Так, чаще вспомогательные ПР должны кантовать объект, переворачивая его на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси; иногда требуется поворот объекта на  $90^\circ$  вокруг горизонтальной или вертикальной оси.
2. *Согласованность с переносными степенями подвижности манипулятора.* В частности, желательно, чтобы вращением по одной, в крайнем случае — по двум ориентирующим степеням подвижности можно было обеспечить неизменность ориентации переносимого объекта, т. е. компенсировать повороты, возникающие при переносе.
3. *Естественные ограничения на углы поворота.* Лишь некоторые типовые конструкции допускают большие (до  $180^\circ$ ) или неограниченные углы поворота.
4. *Ограничения на габаритные размеры механизма ориентирования.* Поскольку механизм ориентирования обычно компоуется вблизи рабочего органа (в частности, схвата), то

ограниченность рабочей зоны может налагать жесткие ограничения на габаритные размеры механизма ориентирования, которые, в свою очередь, существенно зависят от положения осей кинематических пар (обычно габаритные размеры больше по осям пар).

5. *Удобство размещения элементов несущей конструкции и привода.* Преимущества имеют схемы, в которых первая ось вращения направлена по продольной оси руки (совпадает с осью  $u$ ).

С учетом этих факторов рассмотрим основные схемы — с одной, двумя и тремя степенями подвижности. Схема вида  $IBu$ , в которой вращение осуществляется вокруг продольной оси руки, является одной из наиболее распространенных (рис. 3.20). Вращение вокруг продольной оси руки часто называется ротацией. Ротация часто используется в манипуляторах ПР, работающих в цилиндрической системе координат. Она допускает переворачивание объекта (заготовки) вокруг горизонтальной оси  $u$  на  $180^\circ$ , что нередко требуется от ПР, обслуживающих прессы, которые выполняют операции штамповки, вырубки и гибки. Если достаточно переворачивания заготовки на  $180^\circ$ , то требуемые крайние положения вращающейся части обычно задаются упорами. Механизм вращения является консольным. Вал, подшипники и двигатель удобно компонуются вдоль по руке, они могут размещаться внутри руки. Ротация не приспособлена для компенсации вращений при переносе, однако это часто и не нужно при расстановке обслуживаемого оборудования по окружности.

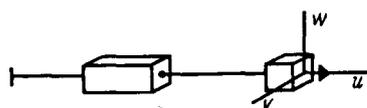


Рис. 3.19

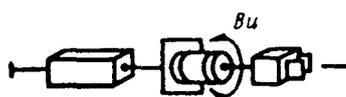


Рис. 3.20

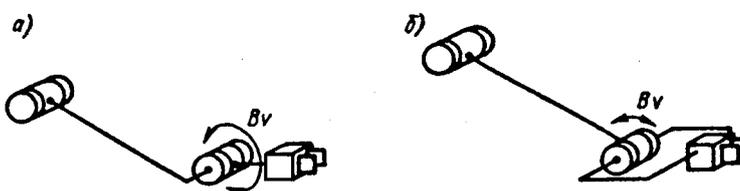


Рис. 3.21

Схема вида  $IBv$ , в которой имеет место качание вдоль боковой оси  $v$  (рис. 3.21,  $a$ ,  $b$ ), хорошо согласуется с манипулятором, имеющим качающуюся руку. В этом случае поворотом вокруг оси  $v$  объект может приводиться в горизонтальную плоскость, для этого угол поворота вдоль этой оси задается равным углу наклона руки, но с обратным знаком. По сравнению со схемой вида  $IBu$  размеры данной схемы по оси  $v$  больше, кроме того, имеются определенные трудности с размещением двигателя. Если механизм является консольным (как на рис. 3.21,  $a$ ), то угол поворота конструктивно не ограничивается, но для получения высокой жесткости приходится специально усиливать конструкцию. Большую жесткость можно получить для варианта схемы с вилкой (рис. 3.21,  $b$ ), но при этом конструктивно ограничивается угол поворота (примерно в пределах  $\pm 90^\circ$ ). Схема вида  $IBw$  приспособлена для манипуляторов с горизонтальной выдвижной рукой. Ориентирующие устройства с такой схемой приспособлены для работы с плоскими заготовками, когда их нужно как угодно поворачивать в горизонтальной плоскости, но не нужно переворачивать вокруг горизонтальной оси. При этом рабочим органом зачастую является вакуумное захватное устройство. Отметим, что, вообще говоря, возможны ориентирующие устройства с одной степенью подвижности с наклонной осью поворота, не совпадающей ни с одной из осей —  $u$ ,  $v$  или  $w$  (рис. 3.22). Но они являются узко специализированными и применяются редко. Ориентирующие механизмы с одной степенью подвижности, как правило, используются во вспомогательных ПР и почти никогда — в технологических ПР.

Рассмотрим схемы с двумя кинематическими парами, оси которых взаимно перпендикулярны. Схеме вида  $IBU2BV$  (рис. 3.23,  $a$ ) обычно соответствуют более простые конструкции, но для нее несколько усложняется программирование. Схема вида  $IBV2BU$  (рис. 3.23,  $b$ ) хорошо согласуется с манипулятором с качающейся

рукой. Вращением вокруг оси  $v$  рабочий орган приводится в горизонтальную плоскость (при этом ось  $w$  становится вертикальной), а далее второй степенью подвижности объект поворачивается в горизонтальной

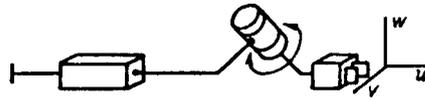


Рис. 3.22

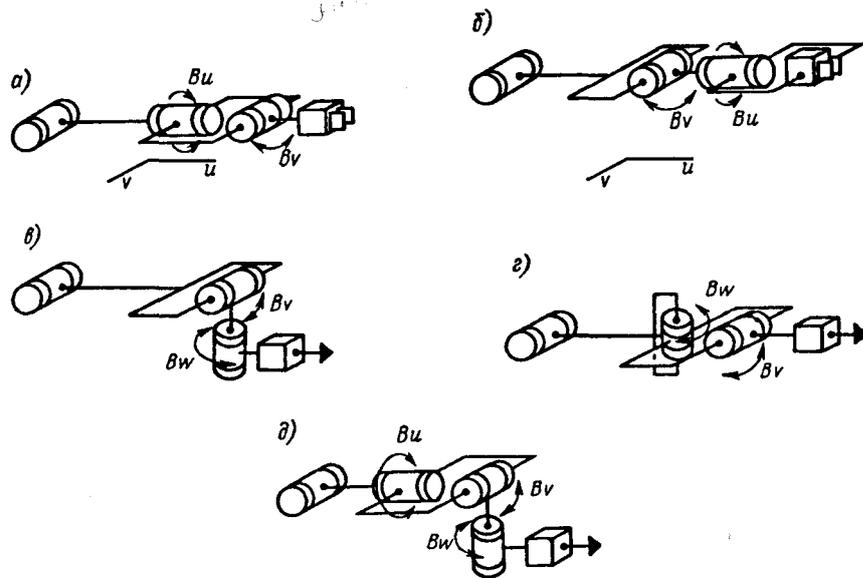


Рис. 3.23

плоскости, как у манипулятора с горизонтальной рукой. Схемы вида  $1BV2BW$  (рис. 3.23, в) и вида  $1BW2BV$  (рис. 3.23, г) практически равноценны по возможности задания движений и по особенностям реализующих их устройств; они преимущественно используются в манипуляторах технологических ПР, в частности, предназначенных для нанесения покрытий или окраски. В этих случаях вращением вокруг осей  $v$  и  $w$  удобнее всего отклонять ось рабочего органа вверх — вниз и вправо — влево, когда рука горизонтальна и направлена в сторону объекта. Три ориентирующие степени подвижности используются в манипуляторах вспомогательных ПР, когда необходимо задавать любую произвольную ориентацию в пространстве рабочего органа.

Чаще всего три ориентирующие степени встречаются в манипуляторах технологических ПР, для которых требуется определенным образом задавать не только положение основной оси рабочего органа, но и всего его в целом. Так, для точечной сварки важно подвести сварочные клещи так, чтобы электроды перемещались перпендикулярно к свариваемым листам и, кроме того, механизм клещей помещался в свободной зоне. Взаимное расположение осей кинематических пар выбирается таким, чтобы в исходном положении механизма все три оси были взаимно перпендикулярными. Конструктивные различия механизмов в значительной мере определяются положением продольной оси  $u$ . Чаще всего встречается схема вида  $1BU2BV3BW$  (рис. 3.23, д).

### Тема 13. Математическое описание манипуляторов

Робот с позиций теории автоматического управления может быть представлен как совокупность объекта управления, которым в данном случае являются исполнительные устройства робота, и устройства управления (рис. 13.1, а). Исполнительные устройства в свою очередь состоят из механической системы и приводов (рис. 13.1, б).

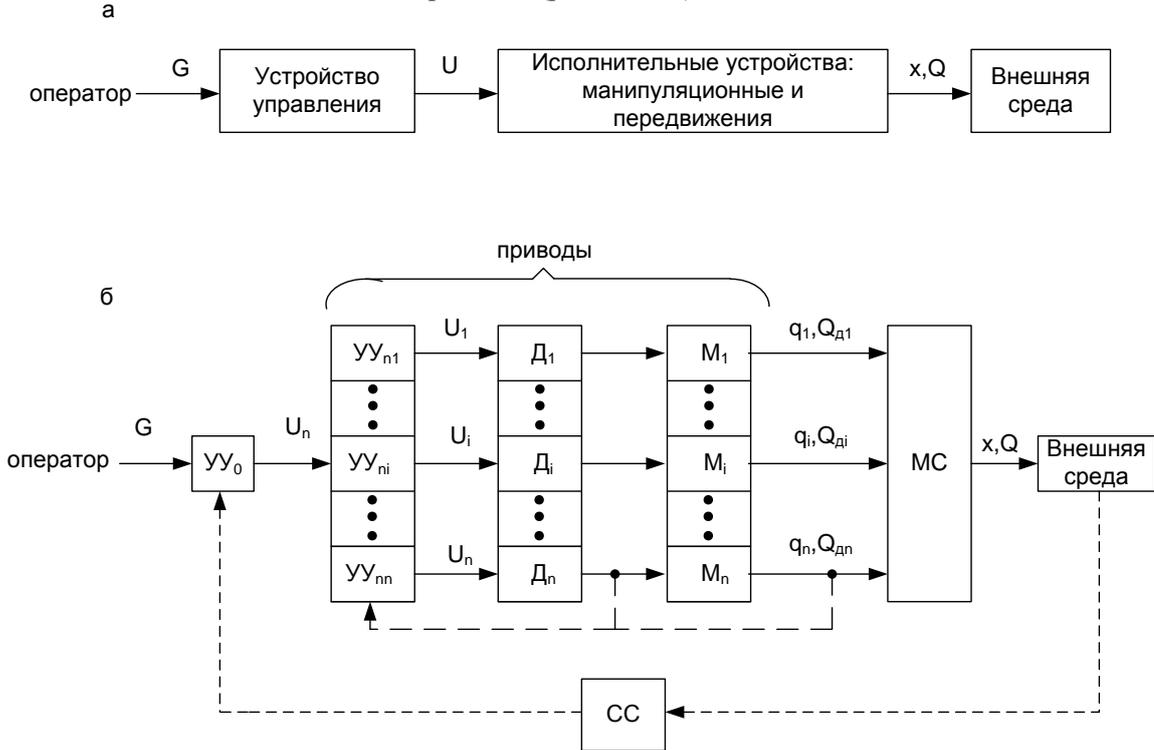


Рис.13.1. Функциональная схема робота: УУ<sub>0</sub>-общее (центральное) устройство управления; УУ<sub>n</sub>- устройство управления привода; Д-двигатель; М-механизм; МС- механические системы: манипуляционная и передвижения; СС - сенсорные системы

#### Математическое описание механической системы манипуляторов

Рассмотрение математического описания роботов начнем с важнейшей их части — манипуляторов. На рис. 13.2 показана типовая кинематическая схема манипуляторов с минимальным числом степеней подвижности, равным 3.

Механическая система манипулятора как объект управления характеризуется:

- типом и числом переносных и ориентирующих рабочий орган степеней подвижности;
- типом и размером рабочей зоны, в рамках которой действует рабочий орган манипулятора.

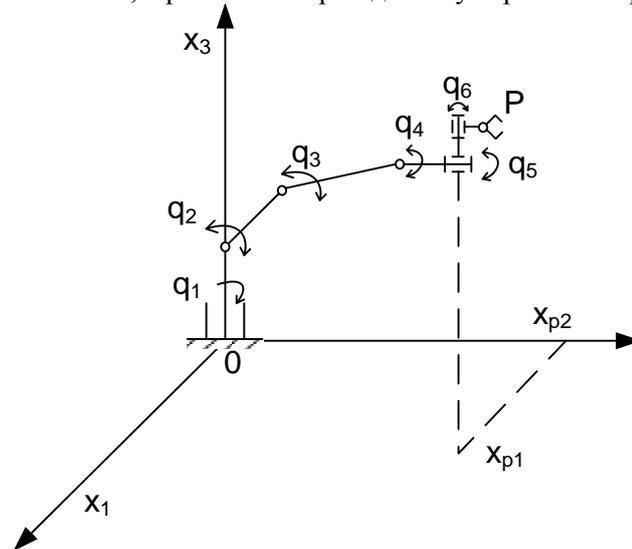


Рис.13.2. Кинематическая схема трехзвенного шарнирного манипулятора: Р- рабочий орган; q<sub>1</sub>,q<sub>2</sub>,q<sub>3</sub>-переносные степени подвижности, q<sub>4</sub>,q<sub>5</sub>,q<sub>6</sub>- ориентирующие степени подвижности

Входные переменные механической системы манипулятора — это усилия  $Q_d$  ( $Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dn}$ ) от двигателей  $D$ , действующие по  $n$  степеням подвижности, а выходные — координаты рабочего органа  $x_p$  и усилие  $Q_p$ , с которым он воздействует на объекты внешней среды. Наибольшее число степеней подвижности рабочего органа  $m$  равно  $6 - 3$  координаты, определяющие положение его центра в пространстве и 3 угла ориентации. Кроме координат рабочего органа интерес могут представлять координаты  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  промежуточных звеньев, определяющие текущую конфигурацию всего манипулятора. Координаты  $x$  определяются в системе координат, неподвижной относительно его основания (рис. 13.2), и называются *абсолютными* (опорными, инерциальными). Относительное положение соседних звеньев манипулятора определяется *относительными* (обобщенными) координатами  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , где  $n$  — число степеней подвижности манипулятора.

Математическое описание механической системы манипулятора связывает указанные ранее выходные переменные  $x, Q$  со входными  $Q_d$ . В свою очередь абсолютные координаты  $x$  определяются относительным положением звеньев манипулятора, т. е. относительными координатами. В целом механическая система манипулятора описывается системой двух следующих уравнений:

$$\begin{cases} x = f(q), \\ q = A_m(Q_d, Q_a) \end{cases} \quad (13.1)$$

Здесь первое уравнение — уравнение кинематики манипулятора, выражающее абсолютные координаты его звеньев  $x$  через их относительные координаты  $q$ , а второе — уравнение динамики для  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , где  $Q_d(Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dn})$  — усилия двигателей, действующие по соответствующим координатам звеньев манипулятора  $q$ , а  $Q_a(Q_{a1}, Q_{a2}, \dots, Q_{an})$  — возмущающие и противодействующие усилия.  $A_m$  — оператор механической системы манипулятора. Уравнения для усилий  $Q_p$ , с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды, будут рассмотрены далее в конце этого раздела.

Рассмотрим последовательно уравнения (13.1). Уравнение  $x=f(q)$  представляет собой выражение для пересчета координат, которое выводится по правилам аналитической геометрии. Пусть требуется найти это выражение для абсолютных координат рабочего органа манипулятора  $x_p(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$ . Введем для каждого звена свою систему координат, в которой происходит перемещение  $q_i$  последующего звена. Если вывести выражение для координат рабочего органа в такой системе координат предыдущего звена, затем аналогично выразить координаты рабочего органа, пересчитанные в систему координат предыдущего ( $n-1$ ) звена через координаты предшествующего ему ( $n-2$ ) звена, то, действуя таким же образом, можно дойти до основания манипулятора, с которым связана система абсолютных координат  $x$ . В результате получим искомое выражение абсолютных координат рабочего органа  $x_p(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$  через относительные координаты всех звеньев  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ .

Напомним методику такого пересчета координат с применением матричного исчисления (рис. 13.3). Пересчет координат точки  $P$  из системы  $(0', x'_1, x'_2, x'_3)$  в систему  $(0, x_1, x_2, x_3)$  описывается векторно-матричным уравнением

$$r = Ar' + n \quad (13.2)$$

или

$$r' = A^{-1}(r - n), \quad (13.3)$$

где  $r = r(x_1, x_2, x_3)$ ;  $r' = r'(x'_1, x'_2, x'_3)$ ;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ — матрица поворота;}$$

$a_{sk} = \cos(i_s, i'_k)$ ;  $s, k = 1, 2, 3$ ;  $i_s, i'_k$  — орты двух рассматриваемых систем координат.

Для матрицы  $A$  справедливы равенства

$$|A| = 1; A^{-1} = A^T, \quad (13.4)$$

где индекс  $T$  означает операцию транспонирования матрицы.

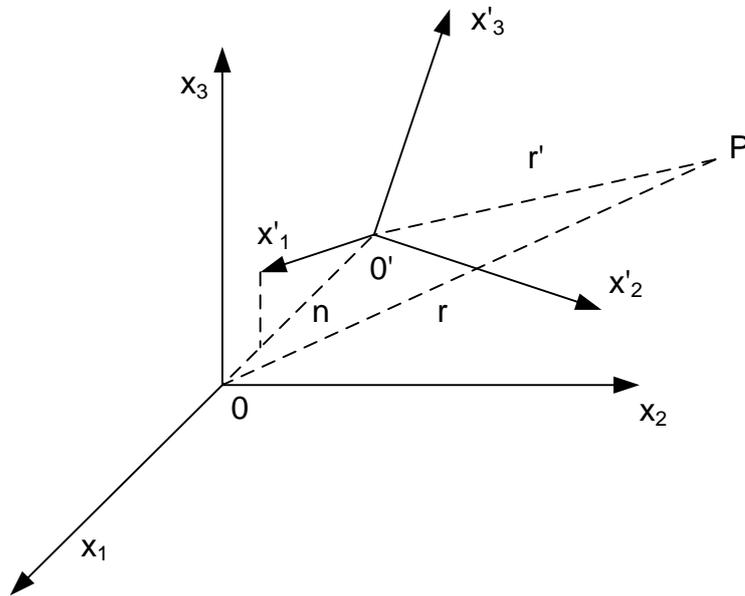


Рис. 13.3. Схема пересчета координат

Если звенья манипулятора имеют одну степень подвижности друг относительно друга, например, поворот на угол  $\varphi$ , то

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13.5)$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Если осуществляется только параллельное смещение в случае поступательного движения звена, уравнение (13.2) принимает вид

$$r = r' + n \quad (13.6)$$

Система уравнений (13.2), составленных для всех подвижных звеньев манипулятора, дает искомое описание кинематики.

Иногда для решения рассматриваемой задачи пересчета координат используют так называемые однородные координаты путем введения векторов четвертого порядка  $r(x_1, x_2, x_3, l)$  и  $r'(x'_1, x'_2, x'_3, l)$ , связанных матрицей

$$B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & n_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & n_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & n_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13.7)$$

Т.е.

$$r = Br' \quad (13.8)$$

из (13.7) следует

$$B = \begin{bmatrix} \dot{A} & | & n \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & | & \bar{1} \end{bmatrix} \quad (13.9)$$

Соответственно  $r' = B^{-1}r$

$$B = \begin{bmatrix} A & -A'n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13.10)$$

где компоненты вектора  $A'n$  есть проекции вектора  $n$  на оси системы координат  $(O', x'_1, x'_2, x'_3)$ . Таким образом, умножив вектор координат  $r'$  на матрицу  $B$ , получим выражение (13.2) для  $r$  через  $A$  и  $n$ . Удобство применения однородных координат состоит в том, что поворот и смещение системы координат осуществляются с помощью одной операции умножения на матрицу  $B$ .

$$A = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & & & \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ \hline \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & & & \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \end{array} \right] \quad (5.5)$$

Если осуществляется только параллельное смещение в случае поступательного движения звена, уравнение (13.2) принимает вид

$$r = r' + n. \quad (5.6)$$

Система уравнений (13.2), составленных для всех подвижных звеньев манипулятора, дает искомое описание кинематики.

Иногда для решения рассматриваемой задачи пересчета координат используют так называемые однородные координаты путем введения векторов четвертого порядка  $r(x_1, x_2, x_3, 1)$  и  $r'(x'_1, x'_2, x'_3, 1)$ , связанных матрицей

$$B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & n_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & n_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & n_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13.7)$$

т.е.

$$r = Br'. \quad (5.8)$$

Из (13.7) следует

$$B = \begin{bmatrix} A & n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Соответственно  $r' = B^{-1}r$ .

$$B = \begin{bmatrix} A & -A'n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

где компоненты вектора  $A'n$  есть проекции вектора  $n$  на оси координат  $(O', x'_1, x'_2, x'_3)$ . Таким образом, умножив вектор координат  $r'$  на матрицу  $B$ , получим выражение (13.2) для  $r$  через  $A$  и  $n$ . Удобство применения однородных координат состоит в том, что поворот и смещение системы координат осуществляется с помощью одной операции умножения на матрицу  $B$ . Соответственно окончательное уравнение пересчета координат рабочего органа в систему абсолютных координат, связанных с основанием манипулятора, согласно уравнению (13.6) будет иметь вид

$$r_1 = \prod_{i=1}^n B_i r_n = B r_n. \quad (5.11)$$

где  $B = \prod_{i=1}^n B_i$ , а  $r_1$  и  $r_n$  — соответственно векторы центра рабочего органа в системе координат относительно первого звена манипулятора, т.е. его основания, и последнего звена, т.е. рабочего органа.

Уравнение (13.11) представляет собой уравнение кинематики манипулятора  $x = f(q)$  в векторной форме. Аналогично осуществляется вывод выражений через относительные координаты  $q$  для углов ориентации рабочего органа в абсолютной системе координат.

Необходимо отметить, что при решении уравнения кинематики должны быть учтены различные

конструктивные и прочие ограничения относительных перемещений звеньев  $q$ .

Перейдем к рассмотрению второго уравнения системы (13.1) — уравнение динамики

$q = A_m(Q_{дi}, Q_{пi})$ , которое связывает относительные координаты звеньев  $q_i$  с действующими на

систему движущими  $Q_{дi}$  и противодействующими  $Q_{пi}$  силами. В зависимости от решаемых задач это уравнение может быть выведено в различной форме из числа известных в теоретической механике — в форме уравнений Ньютона, Гаусса, Даламбера, Лагранжа и их модификаций. Рассмотрим вывод уравнения динамики механической системы манипулятора с помощью уравнения Лагранжа второго рода, поскольку оно наиболее широко используется при исследованиях динамики манипулятора.

Для  $i$ -го звена манипулятора уравнение Лагранжа второго рода в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (5.12)$$

Здесь  $L = K - \Pi$  — функция Лагранжа, где  $K$  и  $\Pi$  — соответственно кинетическая и потенциальная энергия звена;  $Q_i = Q_{дi} - Q_{пi}$  — результирующая сила, приведенная к выходу привода звена.

Уравнение (5.12) можно представить в следующей форме:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_{ij} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j + c_i = Q_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.13)$$

Первый член уравнения (13.13) описывает силы, зависящие от ускорения (соответственно коэффициенты при  $\ddot{q}_j$  характеризуют инерцию звена); второй — скоростные силы (центробежные, кориолисовы, вязкого трения и т.п.), третий — гравитационные, статические.

Систему уравнений звеньев (13.13) можно более кратко записать в математической форме:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q, \quad (5.14)$$

где  $A(q)$  — симметричная матрица размерности  $n \times n$ , описывающая инерционные свойства системы;  $b(\dot{q}, q)$  — вектор скоростных сил размерности  $n$ ;  $c(q)$  — вектор статических сил размерности  $n$ . Физический смысл членов уравнений (13.14) очевиден, и структура уравнения не зависит от метода, которым оно выведено.

Рассмотрим в качестве примера уравнение динамики трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат (см. рис. 3.2) [14].

Кинетическая и потенциальная энергии манипулятора соответственно равны:

$$K = \frac{1}{2} m(\dot{r}^2 + \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_r \left[ r^2 + \left( r - \frac{l}{2} \right)^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2 \right] + m_r \frac{t^2 \dot{\varphi}^2}{24} + \frac{1}{2} m_r \dot{z}^2 + \frac{1}{2} (J_\varphi + J'_\varphi) \dot{\varphi}^2.$$

$$\Pi = (m + m_r + m_z) z g.$$

где  $m$  — масса рабочего органа с полезным грузом;  $m_r$  — масса вертикальной колонны, движущейся по координате  $z$ ;  $m_r$  — масса горизонтальной стрелы, движущейся по координате  $r$ ;  $l$  — длина стрелы;  $J_\varphi$  — момент инерции массы колонны  $m_z$ , приведенный к оси  $\varphi$ ;  $J'_\varphi$  — момент инерции частей колонны, участвующих только в угловом движении, приведенный к оси  $\varphi$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Выражение для кинетической энергии соответствует компоновке манипулятора при которой при среднем положении стрелы она выступает на одинаковую величину  $l/2$  в обе стороны от

вертикальной оси колоны.

Обозначив  $q_1 = \varphi$ ,  $q_2 = z$ ,  $q_3 = r$  и подставив приведенные ранее выражения для  $K$  и  $\Pi$  в (13.12), получим уравнение в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} a_\varphi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\varphi}, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Здесь

$$a_\varphi(r) = J_\varphi + J'_\varphi + (m_r + m)r^2 - m_r l r + m_r \frac{l^2}{3};$$

$$a_z = m + m_r + m_z; \quad a_r = m + m_r;$$

$$b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) = 2 \left[ (m_r + m)r + m_r \frac{l}{2} \right] \dot{r} \dot{\varphi};$$

$$b_r(\dot{\varphi}^2, r) = 2 \left[ m_r \frac{l}{2} - (m_r + m)r \right] \dot{\varphi}^2; \quad c_z = (m + m_r + m_z)g;$$

$M_\varphi$  — момент, действующий по координате  $\varphi$ ;  $F_z, F_r$  — усилия, действующие соответственно по координатам  $z$  и  $r$ . (В скобках указаны координаты, которые входят в выражение для данного коэффициента). Вектор  $b_\varphi$  описывает кореолисову силу, вектор  $b_r$  — центробежную, а вектор  $c$  — силу тяжести.

Соответственно для уравнений (13.14):

$$A = \begin{bmatrix} a_\varphi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_\varphi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\varphi}, r) \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} 0 \\ m + m_r + m_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}.$$

Уравнение (13.15) можно представить системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_\varphi(r) \ddot{\varphi} + b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) &= M_\varphi \\ a_z \ddot{z} + c_z &= F_z \\ a_r \ddot{r} + b_r(\dot{\varphi}, r) &= F_r \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

На рисунке 13.4 показана соответствующая структурная схема, где наглядно представлены, в частности, и выявленные ранее взаимовлияния движений по отдельным степеням подвижности.

Эти нелинейные уравнения можно линеаризовать разложением нелинейных членов в ряд Тейлора с отбрасыванием членов ряда выше первой степени малости. Получим справедливую для малых переменных следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (a_\varphi p + b'_\varphi) p \Delta \varphi + (b''_\varphi p + b''''_\varphi + a'_\varphi \ddot{\varphi}_0) \Delta r &= \Delta M_\varphi \\ a_z p^2 \Delta z &= \Delta F_z \\ (a_r p^2 + b'_r) \Delta r + b''_r p \Delta \varphi &= \Delta F_r \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Здесь  $p$  — символ дифференцирования по времени;  $a'_\varphi \ddot{\varphi}_0; b'_\varphi, b''_\varphi, b''''_\varphi, b'_r, b''_r$  — коэффициенты разложения в ряд Тейлора функций  $a_\varphi, b_\varphi, b_r$  при  $q = q_0$  и  $\dot{q} = \dot{q}_0$ . Индексом "0" отмечены значения переменных, соответствующих статическому режиму, относительно которого берутся их отклонения.

Из уравнения динамики (13.14) для относительных координат  $q$  можно получить уравнение для абсолютных координат, используя связывающее эти переменные уравнение кинематики

$$x = f(q).$$

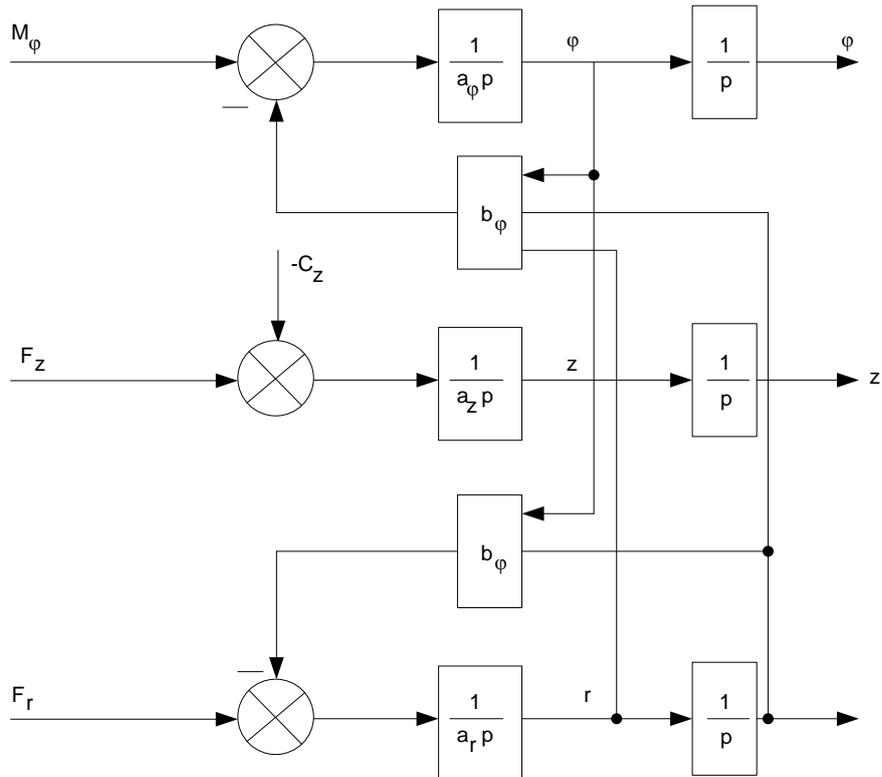


Рис. 13.4. Структурная схема механической системы трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат

Для этого дважды продифференцируем последнее выражение, чтобы перейти в нём к  $\ddot{q}$ , входящему в уравнение (13.14):

$$\dot{x} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q}.$$

где  $J(q) = \partial f(q) / \partial q$  —  $m \times n$  матрица Якоби с элементами

$$\frac{\partial f_i}{\partial q_j}; j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\ddot{x} = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} = J(q) \ddot{q} + D(\dot{q}, q)$$

где  $D(\dot{q}, q) = \dot{J}(q) \dot{q}$  — вектор-столбец с элементами

$$\dot{q}^T \frac{\partial^2 f_k(q)}{\partial q \partial q^T} \dot{q} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial^2 f_k}{\partial q_i \partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j, \text{ где } k = 1, 2, \dots, m.$$

Получив отсюда выражение для  $\ddot{q}$  и подставив в уравнение (13.14) или, наоборот, подставив сюда выражение для  $\ddot{q}$  из уравнения (13.14), получим следующее искомое уравнение для  $x$ :

$$A(q)J^{-1}(q)x + b(\dot{q}, q) + c(q) - A(q)J^{-1}(q)D(\dot{q}, q) = Q. \quad (5.18)$$

Основной интерес представляет это уравнение для координат рабочего органа манипулятора  $x_p$ .

Заметим, что при решении уравнения (13.18) в случае, когда число степеней свободы подвижности манипулятора  $n > m$  — числа степеней подвижности его рабочего органа, возникает неоднозначность в связи с избыточностью степеней подвижности, т.е. с неоднозначностью зависимости  $q = f^{-1}(x)$  и соответственно  $J^{-1}(q)$ . Для ее преодоления обычно вводят какие-нибудь полезные дополнительные условия по числу избыточных степеней подвижности.

Выведем теперь уравнения для усилий, с которыми манипулятор взаимодействует с объектами

внешней среды. Здесь возможно 2 случая. Первый вариант, когда внешняя среда воздействует на манипулятор, оказывая его звеньям определенное сопротивление. В этом случае используется уравнение динамики манипулятора для относительных переменных (13.14) подстановкой в него указанных сил, пересчитываем на эти координаты.

Получаем уравнение

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q' + J^T(q)Q_{\text{внеш}} \quad (13.19)$$

Здесь  $Q' = Q\delta - Q\delta l$ , где  $Q\delta l$  — внутренние возмущающие силы,  $Q_{\text{внеш}}$  — внешние силы, действующие со стороны внешней среды,  $J^T(q)$  — транспонированная  $n \times m$  матрица Якоби, с помощью которой осуществляется пересчет  $Q_{\text{внеш}}$  в систему относительных координат для определенного звена манипулятора с  $m$  степенями подвижности. Выражение  $J^T(q)Q_{\text{внеш}}$  получается из баланса мощностей  $Q_{\text{внеш}} \dot{x} = Q_{B2} \dot{q}$  где  $Q_{B2}$  — действующие на звенья в системе относительных координат силы, вызванные силой  $Q_{\text{внеш}}$ .

Второй вариант силового взаимодействия с внешней средой это силовое воздействие на внешнюю среду рабочим органом самого манипулятора. В этом случае следует пользоваться уравнением динамики для абсолютных координат, по которым осуществляется взаимодействие с внешней средой. Оно получается из уравнения (13.18):

$$A(q)J^{-1}(q)'x \wedge b(q, q) - A(q)j^{-1}(q)D(q, q) \wedge Q_p = Q', \quad (13.20)$$

где  $Q_p$  — выделенные из вектора  $Q$  усилия, создаваемые приводами на рабочем органе и действующие по  $l \leq m$  координатам, по которым осуществляется указанное силовое воздействие на среду. Для остальных  $(m-l)$ -координат уравнение динамики остается прежним — (13.14) или (13.18).

В целом, согласно рассмотренным уравнениям механической системы манипулятора, он как объект управления представляет собой весьма сложный динамический объект — многомерный со взаимосвязанными переменными, нелинейный и нестационарный. Выходными переменными этого объекта являются 6 координат рабочего органа (3 координаты центра и 3 угла его ориентации) и силы взаимодействия с внешней средой, действующие по этим координатам. Из них управляемыми переменными могут быть как координаты рабочего органа, так и действующие по их направлениям усилия, но общим числом — до 6 переменных. Например, при выполнении технологической операции нанесения покрытий с помощью пульверизатора требуется управление всеми 6 координатами. Операция снятия шероховатостей и заусениц с поверхностей требует наряду с управлением координатами для осуществления сканирования рабочим инструментом по этой поверхности еще управления силой, направленной по нормали к ней.

Сегодня в системах управления манипуляторов управление осуществляется, как правило, не по измеряемым координатам рабочего органа  $x_p$  с охватом управляемого объекта обратной связью по  $x_p$ , а по промежуточным переменным, представленным относительными координатами  $q$ . Такое решение объясняется сложностью измерения абсолютных координат рабочего органа. Однако в результате точность позиционирования рабочего органа манипулятора определяется точностью и стабильностью датчиков координат  $q$ , а также стабильностью зависимости  $x_p$  от  $q$ . В результате требования к точности датчиков  $q$  оказываются в несколько раз выше требуемой точности управления  $x_p$ .

Управление усилием на рабочем органе манипулятора осуществляется обычно с помощью  $w$ -компонентных датчиков усилия, расположенных в запястье рабочего органа.

#### Взаимное влияние степеней подвижности манипуляторов

Итак, как изложено ранее, динамика механической системы манипуляторов может быть описана в относительных координатах следующим векторно-матричным уравнением:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = 0$$

Здесь  $A(q)\ddot{q}$  — векторная функция сил инерции, пропорциональных ускорению, где  $A(q)$  — симметричная  $n \times n$  матрица, описывающая инерционные свойства системы,  $n$  — число ее степеней подвижности;  $b(\dot{q}, q)$  —  $n$ -мерный вектор скоростных сил — центробежных, кореолисовых, трения и потерь в сочленениях, зависящих от скорости;  $c(q)$  —  $n$ -мерный вектор

сил тяжести;  $Q$  — вектор сил, действующих по  $n$  степеням подвижности системы.

Наличие  $q$  в скобках означает, что члены этого уравнения зависят от конфигурации манипулятора, т. е. что его механическая система является нестационарной. Важным свойством ее является также взаимосвязанность степеней подвижности, т. с. влияние их друг на друга. Существует четыре типа такого взаимовлияния: влияние на величину инерции, влияние по ускорению  $\ddot{q}$ , по скорости  $\dot{q}$  и положению  $q$ .

Два первых типа взаимовлияния учитываются матрицей

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Влияние на инерцию по  $i$ -ой степени подвижности других степеней учитывается в диагональных элементах  $a_{ii}$  матрицы. Так, в приведенном ранее примере цилиндрической трехстепенной системы такое влияние описывается элементом  $a_{\varphi\varphi}(r)$  в уравнении (13.15). Здесь имеет место зависимость момента инерции по координате  $\varphi$  от координаты  $r$ : с выдвиганием горизонтальной стрелы манипулятора растет инерция вращения его колонны относительно вертикальной оси.

В манипуляторах со сферической системой координат (см. рис. 3.3) величина выдвигания стрелы  $r$  влияет на моменты инерции относительно осей  $\varphi$  и  $\Theta$ . Аналогичное влияние положения звеньев на момент инерции относительно предыдущих осей существует и в манипуляторах с угловой системой координат (см. рис. 3.4 и 13.2).

Второй тип взаимовлияния — по ускорению  $\ddot{q}$  — описывается недиагональными элементами  $a_{ij}$  матрицы  $A(q)$ . Оно заключается в действии по отдельным степеням подвижности сил инерции, пропорциональных ускорениям по другим степеням подвижности. Такое влияние имеет место, например, в шарнирных манипуляторах от предыдущего шарнира на последующие, действующие в одной с ним плоскости.

Третий тип влияния — по скорости  $\dot{q}$  — описывается вектором  $b(q, \dot{q})$ .

В упомянутом примере манипулятора с цилиндрической системой координат — это центробежная сила, действующая по координате  $r$  в функции скорости  $\dot{\varphi}$  (см. выражение для  $b_r(\dot{\varphi}, r)$  в уравнении (13.15)), и кореолисова сила, действующая по  $\varphi$  в функции от произведения  $\dot{\varphi} r$  (см. там же выражение для  $b_{\varphi}(\dot{\varphi}, r, r)$ ).

Четвертый тип влияния — по силе тяжести — учитывается вектором  $c(q)$ . Это влияние силы тяжести звеньев, движущихся не в горизонтальной плоскости. Такое влияние, например, существует в шарнирных манипуляторах, работающих в вертикальной плоскости.

Таким образом, как сказано ранее, манипуляторы как объекты управления представляют собой многомерные взаимосвязанные системы. Конечно, эта взаимосвязанность усложняет задачу управления такими объектами, однако она не обязательно оказывает отрицательное влияние на качество управления. Так, в рассмотренном ранее примере манипулятора с цилиндрической системой координат при выдвигании его стрелы (увеличении  $r$ ) вращение колонны способствует этому движению стрелы за счет центробежной силы по  $\varphi$ . Поэтому хотя с точки зрения облегчения задачи управления желательно каким-то образом развязывать степени подвижности манипулятора, чтобы иметь возможность управлять ими независимо, такой подход в общем случае не является наилучшим в отношении качества управления. Теоретически оптимальное решение дает представление манипулятора в качестве объекта управления как единой многомерной взаимосвязанной системы.

Рассмотрим способы борьбы с взаимовлиянием степеней подвижности, которые следует применять, чтобы в случае необходимости освободиться от этих взаимовлияний. Существуют 2 группы таких способов:

- конструктивные, основанные на уравновешивании массе звеньев манипулятора;
- алгоритмические, реализуемые системой управления.

Простейший вариант первого способа — это уравнивание масс (звеньев противовесами, в том числе автоматически перемещающимися для уравнивания переменных масс, например, полезного груза. Для манипуляторов, все звенья которых перемещаются в одной плоскости, такое уравнивание может обеспечить полное устранение взаимовлияния степеней подвижности (рис. 13.5). Условие уравнивания включается в равенстве моментов сил веса противовесов и веса уравниваемых ими звеньев относительно их оси вращения. Очевидный недостаток такого способа — увеличение инерции звеньев манипулятора и его общей массы. В связи с этим заметим, что для уменьшения момента инерции целесообразно уменьшать расстояние противовеса до ) оси вращения за счет пропорционального увеличения его массы, так как момент инерции пропорционален квадрату этого расстояния, в то время как для снижения массы манипулятора следует поступать противоположным образом.

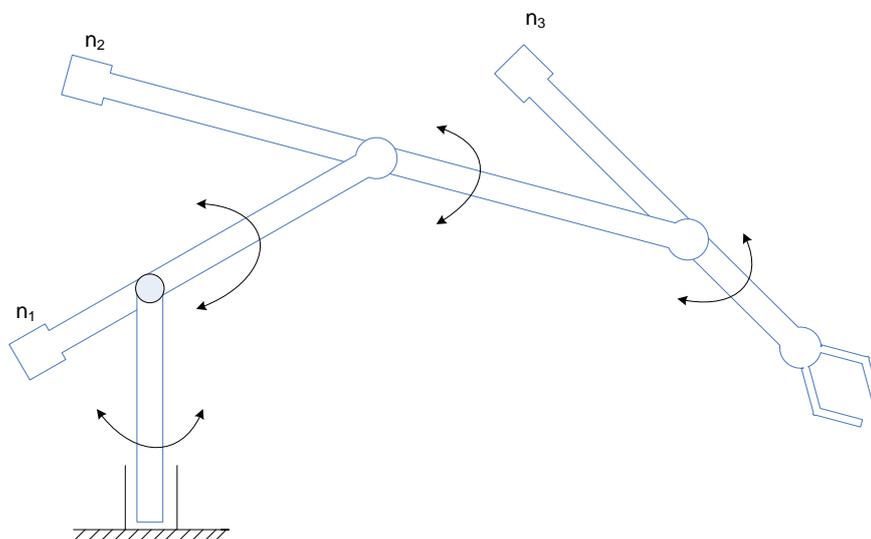


Рис. 13.5. Шарнирный манипулятор с противовесами (П1, П2, П3)

Лучшим решением рассматриваемой задачи является использование в качестве противовеса конструктивно необходимых частей манипулятора путем размещения их по разные стороны оси вращения. К таким частям могут относиться, например, элементы приводов и рабочих органов манипулятора.

Кроме противовесов для уравнивания звеньев применяются пружины и дополнительные приводы, создающие уравнивающее усилие. Пружинные уравнивающие механизмы помимо устранения взаимовлияния степеней позволяют скомпенсировать и гравитационные силы, в том числе полезного груза, и соответственно снизить требуемую мощность двигателей или повысить грузоподъемность манипулятора.

Вторая группа способов устранения взаимовлияния степеней подвижности, основанная на использовании системы управления, заключается в компенсации этих влияний с помощью перекрестных управляющих воздействий на приводы. Таким образом, например, могут быть скомпенсированы взаимные влияния степеней подвижности манипулятора с цилиндрической системой координат (см. рис. 13.4). Для этого через приводы  $M\varphi$  и  $Fr$ , надо ввести перекрестные

воздействия, компенсирующие взаимовлияния между  $\varphi$  и  $r$ . описываемые звеньями  $b\varphi$  по  $r$  и  $\dot{b}$ , по  $\dot{\varphi}, r$ .

Общим средством уменьшения рассматриваемых взаимовлияний является повышение быстродействия систем управления степенями подвижности манипулятора, поскольку это соответственно повышает эффективность парирования возмущений, действующих на эти степени подвижности, включая, разумеется, и их взаимовлияния.

#### Учет упругости звеньев манипулятора

Уравнение динамики (13.14) механической системы манипулятора выведено в предположении абсолютной жесткости ее звеньев, т. е. без учета их упругих деформаций. Рассмотрим теперь, как учитывать эти деформации, и выведем соответствующее уравнение динамики.

Возможны 2 типа упругости в звеньях манипулятора — *сосредоточенная* и *распределенная*. Сосредоточенная упругость может иметь место в сочленениях звеньев, в передачах (зубчатых,

цепных, тросовых и т. п.). Распределенная упругость вызывается гибкостью звеньев, их изгибом или скручиванием.

Чаще всего упругие деформации нежелательны. Они порождают колебания в системе, снижающие быстродействие и создающие дополнительные динамические нагрузки на приводы.

Основная причина появления упругих деформаций — это стремление снизить массу механической системы манипулятора. Минимум ее массы имеет место при расчете манипулятора не на жесткость, а на прочность со снятием соответственно ограничений на упругие деформации в механической системе. Поскольку это, как сказано, ведет к усложнению системы управления, оптимальное решение должно находиться при синтезе обеих систем совместно.

Однако упругость может играть и положительную роль. Так, часто в запястье рабочего органа вводят упругость для создания податливости при выполнении сборочных и других операций с объектами внешней среды. Наконец, существуют манипуляторы типа хобота, в которых управляемая гибкость лежит в основе их принципа действия (см. рис. 3.10).

На рис. 13.6 показана расчетная двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью. Здесь  $M_1$   $M_2$  — соответственно движущий момент на входе и момент нагрузки на выходе звена;  $J_1$   $J_2$  — моменты инерции  $q_1$ ,  $q_2$  — относительные координаты (здесь — углы поворота) на входе выходе звена, так что разность  $(q_1 - q_2)$  — есть угол скручивания гибкого элемента, представленного в виде пружины.

Математическое описание этого звена:

$$\begin{cases} J_1 p^2 q_1 = M_1 - k' p (q_1 - q_2) - k (q_1 - q_2), \\ J_2 p^2 q_2 = k' p (q_1 - q_2) + k (q_1 - q_2) - M_2. \end{cases} \quad (13.21)$$

Здесь  $k, k'$  — коэффициенты жесткости и вязкого трения гибкого элемента,  $p$  — символ дифференцирования по времени.

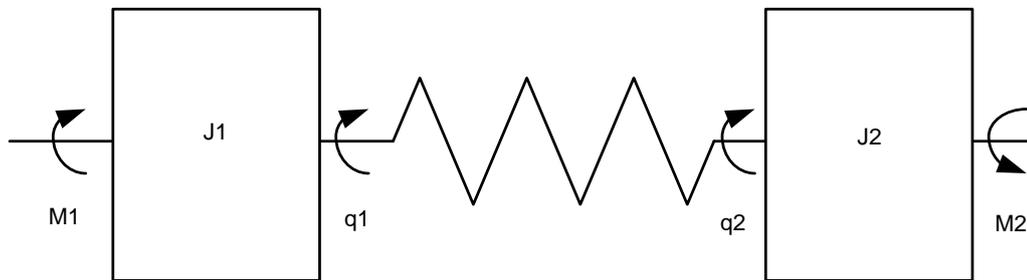


Рис. 13.6. Двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью

Исключив  $q_2$  получим уравнение для  $q_1$ .

$$p^2 (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) q_1 = (k'_1 + k_1) M_1 - (k''_2 p^2 + k'_2 p + k_2) M_2, \quad (13.22)$$

где  $T_1 = \frac{1}{w_0}$ ,  $T_2 = \frac{2\varepsilon_0}{w_0}$ ,  $k'_1 = \frac{2\varepsilon_2 w_2}{w_0^2 J_1}$ ,  $k_1 = \frac{w_2^2}{w_0^2 J_1}$ ,  $k''_2 = \frac{1}{w_0^2 J_2}$ ,  $k'_2 = \frac{2\varepsilon_1 w_1}{w_0^2 J_2}$

$k_2 = \frac{w_1^2}{w_0^2 J_2}$ ;  $w_0 = \left(\frac{k}{J_1} + \frac{k}{J_2}\right)^{1/2}$  - собственная частота звена;

$w_1 = \left(\frac{k}{J_1}\right)^{1/2}$ ,  $w_2 = \left(\frac{k}{J_2}\right)^{1/2}$  - парциальные частоты;

$\varepsilon_0 = \frac{k'}{2} (kJ_1)^{1/2}$ ,  $\varepsilon_2 = \frac{k'}{2} (kJ_2)^{1/2}$ ,  $\varepsilon_0 = \frac{k'}{2} \left(\frac{kJ_1 J_2}{J_0}\right)^{1/2}$  - показатели затухания колебаний;

$$J_0 = J_1 + J_2.$$

При отсутствии вязкого трения  $k' = 0$  и поэтому  $\varepsilon_0 = 0$  и  $T_0 = 0$ . Звено становится колебательным с нулевым затуханием.

Типичное звено с распределенной упругостью — это гибкий стержень, показанный на рис. 13.7. Поворот стержня с массой  $m$  на конце происходит под действием момента  $M_1$  при наличии противодействующего момента  $M_2$ . Такое звено с распределенными параметрами описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Этому соответствует бесконечное число степеней свободы и целый спектр частот колебаний. Однако, если нас интересует только положение конечной точки стержня с массой  $m$ , эту модель можно свести к ранее рассмотренной

дискретной двухмассовой модели. Это соответствует учету только одной основной гармоники колебаний из всего спектра [14].

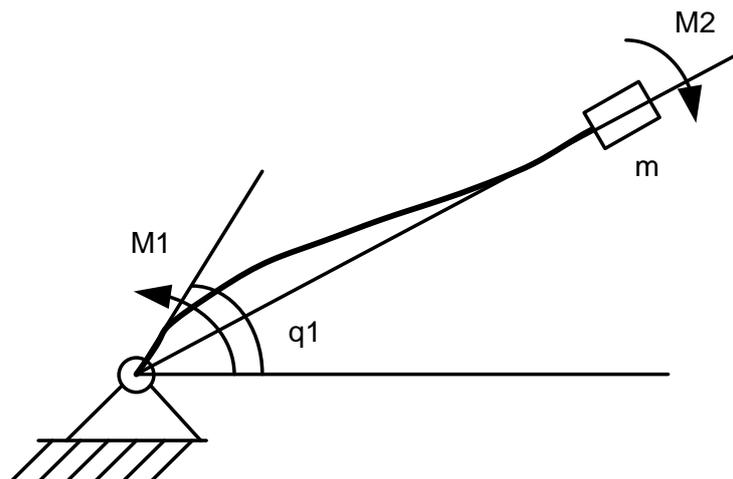


Рис. 13.7. Модель звена с распределенной упругостью

Уравнение динамики всей механической системы манипулятора, содержащей рассмотренные ранее упругие звенья, можно представить в таком виде:

$$\begin{bmatrix} A_{11}(q, q_y) & A_{12}(q, q_y) \\ A_{21}(q, q_y) & A_{22}(q, q_y) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(q, q; \dot{q}_y, q_y) \\ b_2(\dot{q}, q; \dot{q}_y, q_y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k' \dot{q}_y + k q_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(q, q_y) \\ c_2(q, q_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13.23)$$

По сравнению с уравнением (13.14) для относительных координат  $q$  манипулятора без упругих деформаций здесь появились новые "упругие" координаты  $q_y$  и соответствующее уравнение для них. В нем  $k, k'$  — матрицы коэффициентов жесткости и вязкого трения гибких звеньев.

Уравнение (13.23) выводится так же, как ранее уравнение (13.14) для жесткой механической системы манипулятора, с помощью уравнения Лагранжа второго рода (13.12), если в выражениях для кинетической и потенциальной энергий звеньев учесть гибкие звенья [15].

Для более точного описания звена с распределенной упругостью, учитывающего высшие гармоники колебаний, оно разбивается на несколько частей, каждая из которых описывается рассмотренным ранее образом (метод конечных элементов) [15].

При решении задачи управления манипуляторами с гибкими звеньями необходимо принимать специальные меры для гашения колебаний, вызываемых упругими деформациями в этих звеньях. Основным способом является демпфирование этих колебаний с помощью обратных связей по величине упругих деформаций и их первой производной. При этом главная проблема заключается в их определении путем непосредственного измерения деформации датчиками или путем расчета ее с помощью функционально связанных с ней измеряемых переменных (передаваемое через гибкое звено усилие, вызванное последним ускорение и т. п.). Можно также применять стабилизирующие обратные связи непосредственно по этим переменным, не вычисляя деформаций.

#### Математическое описание приводов

Приводы, используемые в манипуляторах, были рассмотрены в главе 4. Это электрические, гидравлические и пневматические позиционные приводы. Кроме того, известны случаи применения в манипуляторах шаговых приводов и приводов с управляемыми муфтами и нерегулируемыми двигателями.

В соответствии с уравнением динамики механической системы манипулятора математическое описание системы приводов манипулятора (13.1) представляет собой зависимость

$$Q_d = A_n(U_n), \quad (13.24)$$

где  $Q_d$  — вектор движущих сил на выходе приводов манипулятора размерности  $n$ , приводящих в движение его степени подвижности;  $A_n$  — оператор системы приводов;  $U_n$  — вектор управляющих воздействий на входе приводов.

Что касается перемещений  $q$  на выходе приводов, то поскольку последние связаны общей механической системой манипулятора, они не являются независимыми переменными и для их нахождения надо решать совместно систему уравнений, описывающих механическую систему с приводами.

Математическое описание двигателя отдельного привода с угловым перемещением (вращающегося) имеет вид:

$$\begin{cases} J_d p w_d = M_d - M_H, \\ (T_d p + 1) M_d = f(U_n, w_d). \end{cases} \quad (13.25)$$

Здесь  $J_d$  — момент инерции;  $M_H$  — момент нагрузки на валу двигателя;  $M_d$  — движущий момент, развиваемый двигателем;  $w_d$  — угловая скорость;  $T_d$  — постоянная времени цепи, связывающей  $M_d$  с управляющим воздействием  $U_n$ ;  $f(U_n, w_d)$  — статическая характеристика двигателя.

В линейном приближении последняя зависимость:

$$f(U_n, w_d) = k_U U_n - k_W w_d$$

С учетом (13.26) система (13.25) сводится к уравнению:

$$(T'_d T_d p^2 + T'_d + 1) w_d = k U_n - \frac{T_d + 1}{k_W} M_H, \quad (13.27)$$

$$\text{где } T'_d = \frac{J_d}{k_W}, k = \frac{k_U}{k_W}$$

Для электрического двигателя  $T_d$  — это электромагнитная постоянная времени, которой обычно можно пренебречь по сравнению с постоянной времени  $T'_d$ , определяемой  $J_d$ . При  $T_d = 0$  уравнение (13.27) принимает вид:

$$(T'_d p + 1) w_d = k U_n - \frac{1}{k_W} M_H \quad (13.28)$$

Математическое описание привода в целом включает кроме двигателя, описание механической передачи на выходе (например, редуктора) и устройства управления. Для типовой схемы привода алгоритм, реализуемый его устройством управления, — это пропорционально-дифференцирующее (ГТД) или пропорционально-интегро-дифференцирующее (ПИД) управление.

При исследовании динамики манипуляторов "в большом" необходимо учитывать нелинейность статической характеристики двигателя — нечувствительность и насыщение по  $U_n$  и  $y_d$ , которые ограничивают быстродействие привода.

#### Математическое описание манипулятора с приводами

В общем виде математическое описание манипулятора включает рассмотренные зависимости:

$$\begin{cases} x = f(q), \\ q = A_M(Q_d, Q_B), \\ Q_d = A_n(U_n). \end{cases} \quad (13.29)$$

Здесь  $A_M$  и  $A_n$  — операторы механической системы и системы приводов манипулятора, а  $U_n$  — вектор управляющих воздействий на входе приводов.

Если воспользоваться уравнением динамики манипулятора (13.14) и линеаризовать уравнение привода по схеме на рис. 4.1, получим структурную схему манипулятора с такими приводами, показанную на рис. 13.8, и систему уравнений:

$$\begin{cases} A(q)p^2 q + b(pq, q) + c(q) = Q_d - Q_B \\ Q_d = W_{n2}(p)U_n - J_d p^2 q, \\ U_n = W_{n1}(p)(q - q_3) - W_{n3}(p)pq. \end{cases} \quad (13.30)$$

Здесь  $U_n$  — вектор управляющих воздействий на входе системы приводов;  $W_{n2}(p)$  — передаточная матрица системы приводов, связывающая векторы  $Q_d$  и  $U_n$ ;  $W_{n1}(p)$ ;  $W_{n3}(p)$  — передаточные матрицы последовательных и параллельных корректирующих звеньев,  $J_d$  — диагональная матрица моментов инерции двигателей, приведенных к выходу приводов  $q$  (умножением на квадрат передаточного отношения редуктора).

$J_{\text{э}}(q) = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n)$  — диагональная матрица эффективных моментов инерции относительно  $q$ ,  $i$ -го и всех последующих звеньев  $(i+1), \dots, n$ , которая находится по формуле:

$$J_{i\text{э}} = \frac{\partial Q_{\text{д}i}}{\partial q_i} \quad (13.32)$$

т. е. исходя из уравнения динамики механической системы манипулятора при замене  $A(q)$  на  $J_3(q)$ . Соответственно это выражение можно представить так:

$$J_{i\text{э}}(q) = \left( \frac{\partial q_i}{\partial Q_{\text{д}i}} \right)^{-1} = [A^{-1}(q)]_{ii}^{-1} \quad (13.32)$$

Кроме того, при наличии в приводах редукторов с большим передаточным числом величинами  $J_{\text{д}i}(q)$  можно пренебречь по сравнению с  $J_m$  и соответственно в уравнении (13.31) пренебречь  $A(q)$ .

2. Обычно, особенно при невысоких скоростях движения, переходные процессы в приводах протекают существенно быстрее, чем перемещения самого манипулятора. Поэтому уравнение манипулятора (13.31) можно разделить на 2 решаемых независимо: одно уравнение в виде уравнения (13.31) при  $p = 0$  в его правой части и второе в виде второго и третьего уравнений системы (13.30).

3. Можно, используя метод "замороженных" коэффициентов, разбить рабочую зону манипулятора на участки, в которых в членах  $b(pq, q)$  и  $c(q)$  уравнения динамики манипулятора ставить постоянные значения  $q$ .

## Тема 14. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧЕЛОВЕК-РОБОТ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Человек-оператор в рамках системы «человек—машина» взаимодействует с предметом труда, машиной и внешней средой посредством информационной модели и органов управления. В АСУ транспортно-складскими комплексами любое изменение в состоянии объекта управления фиксируют устройства контроля. После соответствующей обработки информация об этом предъявляется человеку-оператору с помощью средств отображения, причем оператор своими органами чувств (рецепторами) воспринимает не непосредственное состояние объекта управления, а лишь его информационное отображение, или информационную модель. Эту модель он сравнивает с некоторым эталоном, хранящимся в своей памяти, и вырабатывает стратегию поведения—принимает решение. Решение это он реализует органами движения или речи (эффекторами), в результате чего преобразуется данное состояние объекта управления в необходимое.

Таким образом, целенаправленная деятельность человека-оператора основана на постоянном приеме и анализе информации с помощью анализаторов—подсистем центральной нервной системы человека. Информация, поступающая через анализаторы, называется сенсорной, а процесс ее приема и первичной переработки—сенсорным восприятием, или сенсорной деятельностью. В зависимости от специфики принимаемых сигналов различают анализаторы: внешние—зрительный (рецептор—глаз), акустический (рецептор—ухо), тактильный, болевой и температурный (рецептор—кожа), обонятельный и вкусовой; внутренние—анализатор давления, кинестетический (рецепторы мышц и сухожилий), вестибулярный и специальные, расположенные во внутренних органах и полостях тела.

Человек-оператор, выполняющий роль основного, управляющего, звена АСУ транспортно-складского комплекса, около 90% информации получает через зрительный анализатор, к основным характеристикам которого относятся угловой размер наблюдаемого изображения (угол между двумя лучами, направленными от глаз наблюдателя к крайним точкам изображения), уровень адаптирующей яркости (уровень ее, к которому приспособлен глаз человека), критическая частота мелькания (частота появления светового сигнала, которую глаз еще способен различать), время инерции глаза (время, в течение которого сохраняется воздействие света на сетчатку после фактического окончания этого воздействия), задержка восприятия световых сигналов. Задержка эта зависит от энергии сигналов, которая пропорциональна освещенности наблюдаемого объекта:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{пз}} \left\{ 1 + \left[ \frac{1}{1 + K \lg \left( \frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{вн}}} + 1 \right)} \right]^2 \right\}$$

где  $t_{\text{пз}}$  — время перцептивной задержки:

$$t_{\text{пз}} = \frac{[d - (1 - \alpha\rho)/n] [1 - (\alpha\rho)/n]}{(d + 1) \alpha^2 \rho}$$

$K$  — коэффициент, значение которого экспериментально установлено равным 0,85;

$E_{\text{в}}$  — освещенность воспринимаемого объекта, лк;

$E_{\text{вн}}$  — пороговое значение освещенности, обеспечивающее правильное восприятие изображения объекта, лк;

$d$  — число равновероятных альтернативных сигналов, поступивших извне в оперативную память человека;

$n$  — число нейронных эталонов наблюдаемых объектов, сравниваемых с вновь поступившими сигналами;

$\alpha$  — 10 Гц и  $\rho = 0,01$  с — частотные характеристики электроэнцефалограммы человека.

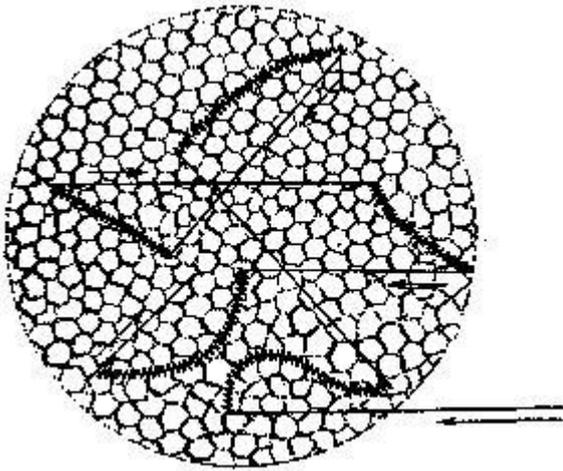
Количество воспринимаемой зрительным анализатором информации (бит) и его пропускную способность определяют соответственно по формулам:

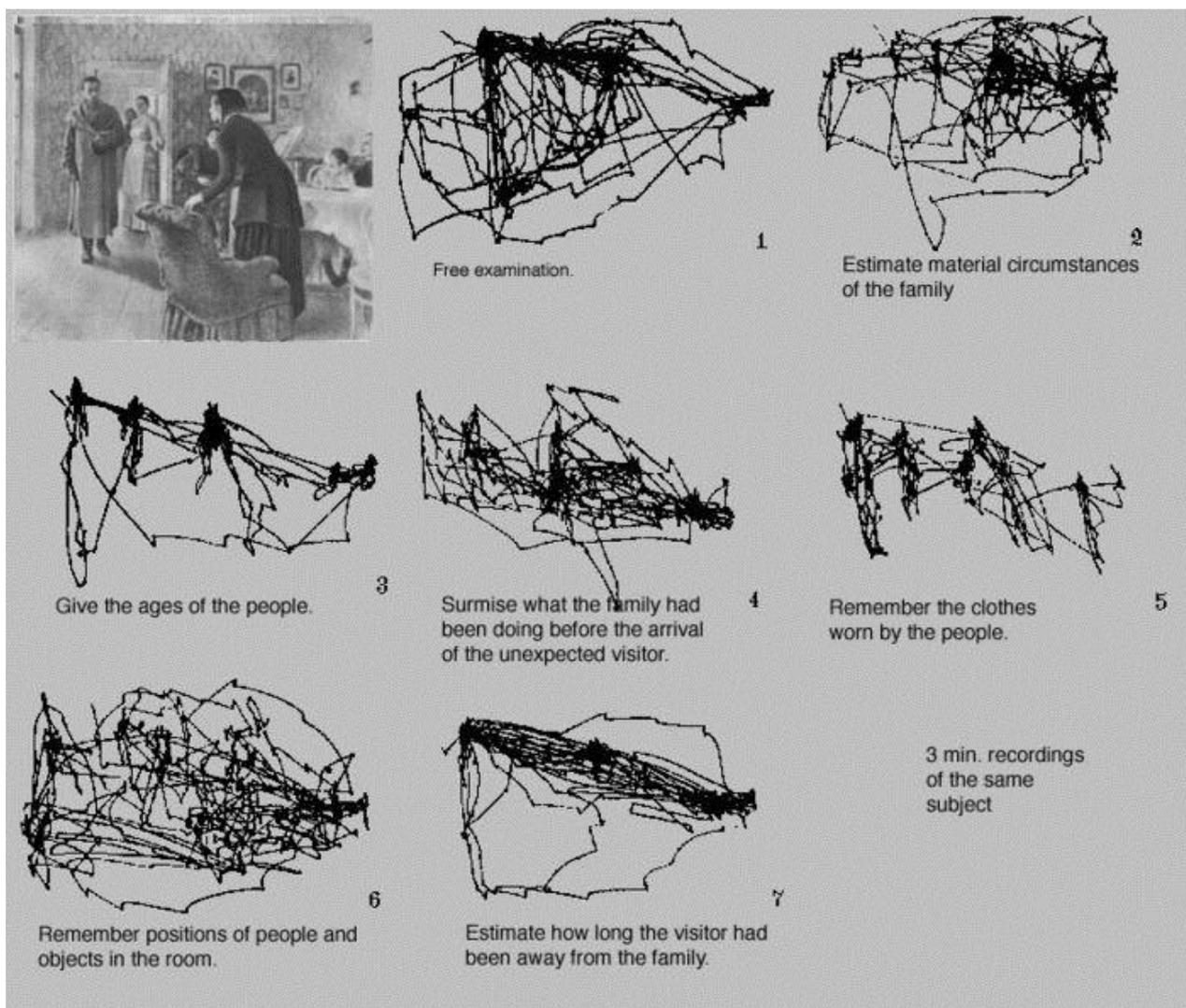
$$N_{\text{за}} = m \log_2 \frac{t_{\text{эф}}}{\Delta t_{\text{эф}}}$$

$$\vartheta_{\text{за}} = \frac{N_{\text{за}}}{t_{\text{э}} - t_{\text{в}}}$$

- где  $m$  — число однотипных приборов или объектов, за которыми человек наблюдает одновременно (вагонов в одной подаче, контейнеров на вагоне или автомобиле и т.д.);
- $t_{\text{эф}}$  — эффективная длина шкалы прибора (индикатор массы груза на товарных весах);
- $\Delta t_{\text{эф}}$  — погрешность, допускаемая человеком при чтении показаний прибора в пределах эффективной длины шкалы;
- $t_{\text{э}}$  и  $t_{\text{в}}$  — время соответственно экспозиций и восприятия считываемых показаний прибора.

Важный показатель зрительного анализатора — также объем восприятия, определяемый числом объектов наблюдения, которые может охватить человек в течение одной зрительной фиксации. При предъявлении ему не связанных между собой объектов наблюдения объем восприятия составляет обычно от 4 до 8 элементов. Большую роль в процессе зрительного восприятия играют движения глаз: поисковые (установочные) и познавательные.





С помощью поисковых движений отыскивается заданный объект наблюдения, глаз устанавливается в исходную позицию, и затем эта позиция корректируется. Длительность поисковых движений при нормальных условиях деятельности определяется углом, на который перемещается взор. При этом время перемещения взора

$$t_{\text{п}} = 0,25 + 0,004\theta_{\text{п}},$$

где  $\theta_{\text{п}}$  — угол перемещения взора, град.

К познавательным относятся движения, участвующие в обследовании объекта наблюдения, его опознании и различении отдельных элементов изображения, например при определении типа вагона, его номера и т.д. Общее время фиксации глаза (когда он неподвижен и взор пристально устремлен на объект) составляет 90—95% общего времени зрительного восприятия и в зависимости от условий изменяется в пределах 0,25—0,65 с. Необходимо отметить, что человек замечает сигналы лишь тогда, когда их параметры превышают пороги чувствительности глаза. Абсолютным порогом световой чувствительности служит минимально обнаруживаемая яркость сигнала 9,571—9,971 кд/м<sup>2</sup>. Инерция равна 0,1—0,2 с для центрального и 0,1—0,32 с для периферийного зрения.

Основные количественные характеристики акустического анализатора — абсолютный и дифференциальный пороги. Нижний абсолютный порог соответствует интенсивности звука в децибелах, обнаруживаемого человеком с вероятностью 0,5, а верхний порог — интенсивности звука, при которой возникают болевые ощущения. Между ними расположена область восприятия речи. Относительная величина дифференциального порога (минимальная разность интенсивности двух сигналов, которую способен распознавать анализатор) для звуков, соответствующих интервалу частот 200—16 000 Гц, примерно 0,002.

Восприятие информации и движение человека связаны посредством сенсомоторных реакций. В реальной деятельности оператора в АСУ транспортно-складского комплекса наиболее характерны

так называемые сложные реакции, в которых действие зависит от вида и характера поступившего сигнала. Время двигательной реакции у человека-оператора, работающего, в частности, за пультом управления подъемно-транспортной машины, в общем случае определяется соотношением

$$\tau_{дв} = a + b \log_2 \frac{2R}{B} = a + b\mu,$$

где  $a = 0,07$  с,  $b = 0,074$  с — константы,  
 $R$  — расстояние, на которое перемещается рука, см;  
 $B$  — ширина органа управления на пульте, см;  
 $\mu$  — комплексный коэффициент трудности выполняемой работы.

При прочих равных условиях время моторной реакции зависит от скорости движения объекта наблюдения (вагона, крана-штабелера и т.д.) и тренированности человека-оператора. Эта зависимость может быть представлена соотношением (по Г. В. Суходольскому)

$$\tau_{р.м} = c \lg v_0 + d,$$

где  $v_0$  — скорость движения объекта ( $2,5 \text{ мм/с} \leq v_0 \leq 50 \text{ мм/с}$ );  
 $c = 0,073 (1 + 0,094 n - 0,00052n^2)$ ;  
 $d = 0,015 (1,6 + 0,15n - 0,001n^2)$ ;  
 $n$  — число тренировок,  $1 \leq n \leq 50$ .

Диапазон скоростей движения рук в большинстве производственных операций находится в пределах от 5 до 800 см/с. Временные характеристики сенсомоторных реакций (латентный период) на такие раздражители, как свет, звук, прикосновение, тепло—холод, составляют соответственно 0,15—0,22; 0,12—0,18; 0,09—0,22; 0,31—0,39 с.

Рассмотрим теперь такие характеристики человека-оператора, как пропускная способность, интегральный показатель качества работы и надежность, которые существенны для его работы в транспортно-складском комплексе. В общем случае пропускная способность человека-оператора — функция типа решаемой им задачи, степени участия его в работе системы, объема выводимой информации, длины используемого алфавита (числа символов, предъявляемых человеку в процессе функционирования системы), размеров символов и т. д. Например, пропускная способность для считывания информации с первичных грузовых документов при равномерном законе поступления символов

$$\phi = \frac{m \log_2 A}{T},$$

где  $T$  — время отображения информации;  
 $m$  — число правильно опознанных символов;  
 $A$  — длина алфавита.

Оптимальная скорость приема и переработки информации, воспринимаемой всеми видами рецепторов и анализаторов человека, равна 0,1—5,5 бит/с. Уменьшение частоты поступления информации снижает активность человека-оператора, а увеличение уменьшает скорости ее приема и переработки. Средняя длительность (с) зрительной фиксации информации различных задач следующая:

поиск условных знаков — 0,3;

поиск буквенно-цифровых формуляров — 0,31;

ознакомление с ситуацией, обозначенной условными знаками, — 0,64;

обнаружение изменений в знакомой ситуации, обозначенной условными знаками, — 0,55;

счет условных знаков — 0,52;

фиксация загорания или погасания индикатора — 0,2а.

Корреляционная зависимость, характеризующая время упорядочивания оператором наблюдаемых объектов и количество этих объектов, следующая:

$$t_y(x, y) = 0,174xy - 0,056x - 0,28y + 1,$$

где  $x$  — число объектов наблюдения (грузовые места, транспортные средства и др.);  
 $y$  — число контролируемых параметров объектов (номера вагонов, контейнеров и др.)

Для описания качества деятельности человека-оператора целесообразно использовать некоторый критерий, учитывающий как точность, так и своевременность решения задачи, в частности интегральный показатель качества работы:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{\sum_{i=1}^{K_1} X_i^{(1)} k_i^{(1)}}{K_1} + \frac{\sum_{j=1}^{K_2} [M_j^{(2)} + 3\sigma_j^{(2)}] k_j^{(2)}}{K_2}$$

где  $K_1$  — число основных параметров, определяющих точность управления;

$K_2$  — число основных параметров, определяющих временные характеристики деятельности человека-оператора;

$X_i^{(1)}$  — моментные отклонения основных временных параметров управляемого транспортно-складского комплекса;

$M_j^{(2)}$  и  $\sigma_j^{(2)}$  — статистические показатели, отражающие отклонения точностных параметров от заданных значений и их инвариантность;

$k_i^{(1)}$  и  $k_j^{(2)}$  — коэффициенты, соответствующие заданным точностным и временным параметрам АСУ транспортно-складского комплекса.

Надежность человека-оператора определяется его способностью сохранять заданную эффективность работы при усложнении окружающей обстановки и характеризуется безошибочностью, готовностью, восстанавливаемостью и своевременностью действий. Основным показателем безошибочности — вероятностью безошибочной работы на уровне как отдельного действия, так и деятельности в целом. Коэффициент готовности представляет собой вероятность включения человека-оператора в работу в любой произвольный момент времени:

$$k_{\text{г.ч-о}} = 1 - T_0/T,$$

где  $T_0$  — время, в течение которого человек-оператор по разным причинам не может принять поступившую к нему информацию;

$T$  — общее время работы человека-оператора.

В качестве восстанавливаемости обычно используют вероятность исправления оператором допущенной ошибки:

$$P_{\text{исп}} = P_{\text{к}} P_{\text{обн}} P_{\text{и}}.$$

где  $P_{\text{к}}$  — вероятность выдачи сигнала схемой контроля;

$P_{\text{обн}}$  — вероятность обнаружения оператором этого сигнала;

$P_{\text{и}}$  — вероятность исправления ошибки при повторном выполнении действия.

Показатель своевременности — вероятность выполнения оператором задачи в течение времени, не превышающего некоторого своего допустимого значения. Надежность человека-оператора транспортно-складской системы не постоянная величина, а меняется с течением времени (рис. 58). Это обусловлено как изменением условий деятельности, так и колебаниями в состоянии человека.

Необходимо отметить также влияние на показатели деятельности человека-оператора АСУ транспортно-складской системы таких факторов внешней среды, как температура, давление и влажность окружающего воздуха, освещенность рабочего места, шумы, вибрация и др. К основным факторам, создающим дискомфортные условия и отрицательно влияющим на работоспособность человека, можно отнести повышенную или пониженную температуру воздуха, высокую влажность и интенсивное движение воздуха. Для большинства людей комфортными считаются температура окружающей среды примерно 20—22 °С, влажность в пределах 30—60% и скорость движения воздуха не более 0,2 м/с.

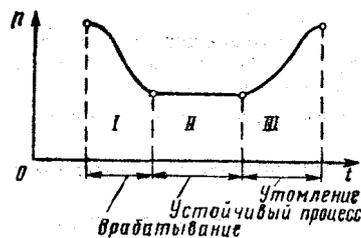


Рис. 58. Зависимость числа ошибок человека-оператора от времени

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная

1. А.А. Тимошин, И.И. Мачульский. Комплексная механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ. – М.: Маршрут, 2003. – 400 с.
2. Е.И. Юревич. Основы робототехники. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. А.А. Смехов. Автоматизация управления транспортно-складскими процессами. – М.: Транспорт, 1985. – 239с.
4. И.Б. Челпанов. Устройство промышленных роботов. – СПб.: Политехника, 2001. – 203с.
5. А.А. Пижурин. Электрооборудование и энергоснабжение лесопромышленных и деревообрабатывающих предприятий. –М.: Лесная пром-ть, 1987.
6. П.В. Ползик, Л.Г. Молчанов, В.К. Вороницин. Автоматика и автоматизация производственных процессов деревообрабатывающих предприятий. –М.: Лесная пром-ть, 1987, -440 с.

### Дополнительная

1. В.Л. Конюх Основы робототехники. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 281 с.
2. Ю.М. Сафонов. Электроприводы промышленных роботов. –М.: Энергоатомиздат, 1990, -352 с.
3. МикроЭВМ, микропроцессоры и основы программирования. –Мн.: Высшая школа, 1990, -352 с.
4. Гибкие механообрабатывающие производственные системы. –М.: Высшая школа, 1987. -103 с.