

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет  
Факультет транспортных коммуникаций  
Кафедра «Механизация и автоматизация дорожно-строительного  
комплекса»

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Автоматика, автоматизация и автоматические системы управления  
технологическими процессами»**

для специальности

6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных и технологических  
машин и комплексов»,  
профилизация «Эксплуатация и технический сервис подъемно-  
транспортных, дорожно-строительных и технологических машин  
строительного комплекса»

Минск ◇ БНТУ ◇ 2025

Составитель: А.И. Антонец, доцент кафедры «Механизация и автоматизация дорожно-строительного комплекса».

Рецензенты :

Мохов С.П. - к.т.н., доц., зав. кафедрой лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства БГТУ

Матвейчук Н.М. - к.ф.-м.н., доц., зав. кафедрой автоматизированных систем управления производством БГАТУ

.

### **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА (ВВЕДЕНИЕ)**

Электронный учебно-методический комплекс (далее – ЭУМК) «Автоматика, автоматизация и автоматические системы управления технологическими процессами» предназначен для студентов специальности 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных и технологических машин и комплексов»

В ЭУМК рассматриваются теоретические основы и технические средства автоматики. Дисциплина базируется на общенаучных и общетехнических дисциплинах: математике, физике, химии, электротехнике. Изучение дисциплины является составной частью изучения общепрофессиональных дисциплин.

При написании учебно-методического комплекса использованы материалы, изложенные в учебниках, учебных пособиях, методических указаниях, технических нормативно-правовых актов, научных статьях, материалах научно-практических конференций. Настоящий учебно-методический комплекс отражает опыт преподавания данной дисциплины, накопленный на кафедре «Механизация и автоматизация дорожно-строительного комплекса» БНТУ.

#### **Цели ЭУМК**

Цель ЭУМК – активно закрепить, обобщить, углубить и расширить знания, полученные при изучении базовых дисциплин, приобрести новые знания и сформировать умения и навыки, необходимые для изучения специальных инженерных и технологических дисциплин и для последующей инженерной деятельности.

Задачи дисциплины заключаются в изучении основ теории автоматического управления и регулирования строительными, дорожными и грузоподъемными машинами, их механизмами и устройствами, технологическими процессами и принципов построения технических средств для автоматизации процессов.

#### **Особенности структурирования и подачи учебного материала**

ЭУМК включает учебные, научные и методические материалы по учебной дисциплине «Автоматика, автоматизация и автоматические системы управления технологическими процессами». Состоит из четырех разделов:

теоретического, практического, контроля знаний, вспомогательного (литература). В теоретический раздел входит курс лекций. В практическом разделе приведены методические указания к выполнению лабораторных, практических и контрольных работ. Раздел контроля знаний включает вопросы для подготовки к сдаче экзамена.

Предложенные материалы являются основой для изучения учебной дисциплины «Автоматика, автоматизация и автоматические системы управления технологическими процессами» для студентов специальности 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных и технологических машин и комплексов»

### **Рекомендации по организации работы с ЭУМК**

Электронный документ открывается в среде ОС Windows на IBM PC - совместимом персональном компьютере стандартной конфигурации.

## Оглавление

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ЧАСТЬ 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ .....</b>                 | <b>7</b>   |
| <b>ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ .....</b> | <b>7</b>   |
| 1.1. Автоматизация управления машинами, технологическими процессами .....      | 7          |
| 1.2. Основные термины и определения автоматики .....                           | 12         |
| 1.3. Конструкторская документация - схемы систем автоматики .....              | 14         |
| <b>ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ САУ И РЕЖИМЫ ЕЕ РАБОТЫ .....</b>               | <b>32</b>  |
| 2.1. Фундаментальные принципы управления .....                                 | 32         |
| 2.2. Основные виды САУ .....                                                   | 38         |
| <b>ГЛАВА 3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ САУ .....</b>                                        | <b>42</b>  |
| 3.1. Статические режимы работы САУ .....                                       | 42         |
| 3.1.1 Статические характеристики .....                                         | 42         |
| 3.1.2 . Статическое и астатическое регулирование .....                         | 46         |
| 3.2. Динамический режим САУ .....                                              | 48         |
| 3.2.1 Уравнение динамики САУ .....                                             | 48         |
| 3.2.2 Передаточная функция .....                                               | 50         |
| 3.2.3 . Элементарные динамические звенья .....                                 | 51         |
| 3.3. Структурные схемы в САУ .....                                             | 52         |
| 3.4. Нелинейные системы автоматического управления .....                       | 56         |
| <b>ГЛАВА 4. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ .....</b>                             | <b>62</b>  |
| 4.1. Понятие временных характеристик .....                                     | 62         |
| 4.2. Переходные характеристики элементарных звеньев .....                      | 64         |
| 4.2.1 Безынерционное (пропорциональное, усилительное) звено .....              | 64         |
| 4.2.2 Интегрирующее (астатическое) звено .....                                 | 64         |
| 4.2.3 Инерционное звено первого порядка (апериодическое) .....                 | 65         |
| 4.2.4 Инерционные звенья второго порядка .....                                 | 67         |
| 4.2.5 Дифференцирующее звено .....                                             | 68         |
| 1.1.1 Запаздывающее (чистого или транспортного запаздывания) звено .....       | 69         |
| <b>ГЛАВА 5. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ .....</b>                             | <b>71</b>  |
| 5.1. Понятие частотных характеристик .....                                     | 71         |
| 5.2. Частотные характеристики типовых звеньев .....                            | 73         |
| 5.2.1 Безынерционное звено .....                                               | 74         |
| 5.2.2 Интегрирующее звено .....                                                | 74         |
| 5.2.3 Апериодическое звено .....                                               | 75         |
| 5.2.4 Правила построения ЧХ элементарных звеньев .....                         | 76         |
| 5.3. Частотные характеристики разомкнутых одноконтурных САУ .....              | 77         |
| <b>ГЛАВА 6. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВО САР .....</b>                      | <b>82</b>  |
| 6.1. Характеристики объекта управления .....                                   | 82         |
| 6.2. Законы регулирования .....                                                | 84         |
| 6.3. Понятие устойчивости системы .....                                        | 94         |
| 6.4. Основные условия устойчивости .....                                       | 96         |
| 6.5. Частотные критерии устойчивости САУ .....                                 | 103        |
| 6.6. Качество регулирования САУ .....                                          | 109        |
| 6.7. Синтез и коррекция САР .....                                              | 115        |
| 6.8. Моделирование в автоматике .....                                          | 116        |
| <b>ЧАСТЬ 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ .....</b>                          | <b>128</b> |

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ГЛАВА 7. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ .....</b>                               | <b>128</b> |
| 7.1. <i>Полупроводниковые диоды .....</i>                                                | <i>128</i> |
| 7.2. <i>Полупроводниковые тиристоры.....</i>                                             | <i>136</i> |
| 7.3. <i>Транзисторы .....</i>                                                            | <i>140</i> |
| 7.4. <i>Оптоэлектронные приборы .....</i>                                                | <i>151</i> |
| <b>ГЛАВА 8. АНАЛОГОВЫЕ И АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ.....</b>          | <b>154</b> |
| 8.1. <i>Операционные усилители .....</i>                                                 | <i>154</i> |
| 8.2. <i>Компараторы. ....</i>                                                            | <i>159</i> |
| 8.3. <i>Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП).....</i>                                   | <i>161</i> |
| 8.4. <i>Аналого-цифровые преобразователи.....</i>                                        | <i>163</i> |
| 8.5. <i>Устройства выборки и хранения.....</i>                                           | <i>165</i> |
| <b>ГЛАВА 9. ЦИФРОВЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИКИ.....</b>                                           | <b>167</b> |
| 9.1. <i>Микропроцессоры .....</i>                                                        | <i>167</i> |
| 9.2. <i>Программируемый логический контроллер. ....</i>                                  | <i>182</i> |
| 9.3. <i>РС-контроллеры .....</i>                                                         | <i>185</i> |
| <b>ГЛАВА 10. ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОПНЕВМОАВТОМАТИКИ .....</b>                                    | <b>187</b> |
| 10.1. <i>Общие сведения о гидропневмоавтоматике .....</i>                                | <i>187</i> |
| <b>ГЛАВА 11. ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА .....</b>                      | <b>204</b> |
| 11.1. <i>Характеристики датчиков .....</i>                                               | <i>204</i> |
| 11.2. <i>Чувствительные элементы датчиков .....</i>                                      | <i>208</i> |
| 11.2.1 <i>Механические чувствительные элементы датчиков .....</i>                        | <i>209</i> |
| 11.2.2 <i>Потенциометрические чувствительные элементы .....</i>                          | <i>211</i> |
| 11.2.3 <i>Тензочувствительные элементы.....</i>                                          | <i>212</i> |
| 11.2.4 <i>Индуктивные чувствительные элементы .....</i>                                  | <i>213</i> |
| 11.2.5 <i>Индукционные чувствительные элементы.....</i>                                  | <i>214</i> |
| 11.2.6 <i>Емкостные чувствительные элементы.....</i>                                     | <i>215</i> |
| 11.2.7 <i>Пьезоэлектрические чувствительные элементы .....</i>                           | <i>216</i> |
| 11.2.8 <i>Фотоэлектрические чувствительные элементы .....</i>                            | <i>217</i> |
| 11.2.9 <i>Элементы, чувствительные к температуре.....</i>                                | <i>222</i> |
| <b>ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ.....</b>                       | <b>226</b> |
| 12.1. <i>Общие сведения об электрических аппаратах.....</i>                              | <i>227</i> |
| 12.2. <i>Неавтоматические выключатели .....</i>                                          | <i>227</i> |
| 12.3. <i>Предохранители .....</i>                                                        | <i>230</i> |
| 12.4. <i>Автоматические выключатели .....</i>                                            | <i>231</i> |
| 12.5. <i>Устройство защитного отключения (УЗО) .....</i>                                 | <i>233</i> |
| 12.6. <i>Реле .....</i>                                                                  | <i>234</i> |
| 12.7. <i>Герконы.....</i>                                                                | <i>238</i> |
| 12.8. <i>Аппараты управления .....</i>                                                   | <i>239</i> |
| 12.9. <i>Электропривод. Основные понятия. ....</i>                                       | <i>242</i> |
| 12.10. <i>Управление электроприводом. ....</i>                                           | <i>245</i> |
| <b>ЧАСТЬ 3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ .....</b> | <b>249</b> |
| <b>ГЛАВА 13. ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....</b>             | <b>249</b> |
| 13.1. <i>Иерархичность объектов управления (ОУ) .....</i>                                | <i>249</i> |
| 13.2. <i>Эскалаторы. Устройства безопасности. ....</i>                                   | <i>251</i> |
| 13.3. <i>Инжекционная система ДВС.....</i>                                               | <i>258</i> |
| 13.4. <i>Автоматизированные системы управления автогрейдером. ....</i>                   | <i>265</i> |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 13.5. Краны. Устройства автоматики ..... | 271        |
| <b>ЛИТЕРАТУРА ОСНОВНАЯ.....</b>          | <b>276</b> |
| <b>ЛИТЕРАТУРА ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ .....</b>   | <b>277</b> |

## Часть 1. Основы теории автоматического управления

### Глава 1. Принципы построения автоматизированных систем управления

#### 1.1. Автоматизация управления машинами, технологическими процессами

**Автоматика** – отрасль науки и техники, охватывающая теорию и устройства средств и систем автоматического управления машинами и технологическими процессами. Она возникла в 19 веке с появлением механизированного производства на базе прядильных и ткацких станков, паровых машин и др., которые заменили ручной труд и дали возможность повысить его производительность. Автоматизации всегда предшествует процесс полной механизации – такого производственного процесса, в котором человек не затрачивает на выполнение операций физической силы. По мере развития техники функции управления процессами и машинами расширялись и усложнялись. Человек уже во многих случаях не был в состоянии управлять механизированным производством без специальных дополнительных устройств. Это обусловило возникновение автоматизированного производства, при котором работники высвобождаются не только от физического труда, но и от функций контроля за машинами, оборудованием, производственными процессами и операциями, а также управления ими.

**Под автоматизацией производственных процессов понимают комплекс технических мероприятий по разработке новых технологических процессов и создание производства на основе высокопроизводительного оборудования, выполняющего все основные операции без непосредственного участия человека.**

Автоматизация способствует значительному повышению производительности труда, улучшению качества продукции и условий труда людей. Механизация и автоматизация строительного производства дают возможность увеличивать темпы строительства, снижать трудоемкость и стоимость работ, повышать их качество, улучшать и облегчать условия труда обслуживающего персонала, обеспечивать безопасность выполняемых работ, перейти к завершению полной механизации тяжелых и трудоемких процессов и от механизации отдельных простых процессов строительства к комплексной их механизации и автоматизации. В строительстве различают механизированные, комплексно-механизированные и автоматизированные виды работ.

При механизированных работах основные операции выполняются с помощью машин, оборудования, установок и инструментов, имеющих механический, электрический, пневматический, гидравлический и комбинированные приводы. *Например, наиболее трудоемкая операция*

*технологического процесса по отрывке грунта при производстве земляных работ выполняется экскаватором.*

При комплексно-механизированных работах все основные и вспомогательные тяжелые и трудоемкие операции и процессы механизированы. В этом случае все машины, оборудование и другие средства механизации должны быть взаимосвязаны по производительности и обеспечивать заданный ведущей машиной темп работ при наивысших технико-экономических показателях. *Например, при производстве земляных работ экскаватором выполняется отрывка грунта, автосамосвалом — его транспортирование, а бульдозером, автогрейдером и уплотняющей машиной (катком, трамбовкой) — зачистка, разравнивание, планирование и уплотнение грунта. При этом в указанном комплекте машин экскаватор является ведущей, а остальные — вспомогательными машинами.* Так как существующие типы и типоразмеры машин не всегда могут обеспечить полное соответствие их производительности сменному потоку работ, то необходимо всегда выявлять образующийся между ними разрыв и подбирать такое сочетание, при котором не полностью используются только наиболее дешевые в эксплуатации машины или же ввод этих машин осуществлять на определенных этапах работ.

Автоматизация производственных процессов включает в себя понятия «автоматика» и «автоматизация», которые не следует отождествлять. Автоматика — отрасль науки и техники, разрабатывающая теорию и методы автоматизации производственных процессов, а автоматизация — это применение технических средств автоматики, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в производственном процессе.

При автоматизированных процессах различают частичную, комплексную и полную автоматизацию.

Частичная автоматизация предусматривает применение автоматического оборудования, приборов и устройств на отдельных, преимущественно основных производственных операциях. Большинство строительных машин и оборудования оснащено такими приборами и устройствами для отключения или ограничения действия машин и их рабочих органов, учета работы, регулирования скорости движения рабочих органов, траектории их движения (глубина копания траншей с заданным уклоном для землеройно-транспортных машин, подача сборных элементов к месту их установки по кратчайшему пути для монтажных кранов и др.) и т. д.

Комплексная автоматизация предусматривает применение системы связанных в единую технологическую линию отдельных агрегатов, машин, приборов и устройств, осуществляющих все (как основные, так и вспомогательные) операции производственного процесса. При этом

оператором или машинистом выполняются только операции пуска и остановки, а поддержание заданных параметров производственного процесса во всех его звеньях происходит автоматически.

Полная автоматизация позволяет выполнять не только все основные и вспомогательные производственные операции, но и полностью осуществлять автоматическое управление и контроль за процессами, в том числе изменение по заданной программе параметров и вида продукции.

Степень автоматизации технологических процессов имеет три уровня в зависимости от доли участия человека-оператора в управлении.

Уровень автоматизации производственного процесса – отношение количества автоматизированных операций  $N_a$  к общему их количеству  $N$

$$\alpha = N_a / N.$$

Процесс называют автоматическим, если  $\alpha \geq 0.98$ : при  $0.98 \geq \alpha \geq 0.5$  процесс автоматизированный. Если  $\alpha < 0.5$ , технологический процесс имеет уровень низкий автоматизации и приближается к операторному (ручному) управлению.

В строительстве и промышленности строительных материалов автоматизированы производственные процессы на асфальто- и цементобетонных заводах, заводах железобетонных изделий и домостроительных комбинатах, а также на строительных, дорожных машинах и оборудовании при выполнении отдельных, обычно основных, операций.

Автоматизация объекта предусматривает оснащение различными подсистемами: *информационными*, которые в свою очередь включают подсистемы: контроля и измерения; сигнализации (различаются формой подачи информации); *защитными*, которые включают средства технологической и аварийной защиты, технологической и аварийной блокировки, предохраняющие оборудование от последствий неправильной эксплуатации; *управляющими*, к которым относят подсистемы телеуправления, включая дистанционное управление, телемеханические подсистемы, диспетчеризации, автоматического управления и регулирования.

В каждой строительной и дорожной машине используются различные комбинации указанных видов устройств, однако основным направлением является автоматизация управления рабочими органами.

Неавтоматическое управление машиной бывает ручное и механизированное. В первом случае человек сам определяет необходимые действия по управлению технологическим процессом, осуществляет и контролирует их визуально или по показаниям простейших приборов. Во втором случае технологический процесс (рис.1.1, а) управляется с помощью исполнительных механизмов, использующих дополнительную энергию (электрическую, сжатого воздуха или рабочей жидкости). При этом приборы

через соответствующие преобразователи только информируют человека о нарушениях технологического процесса.

При автоматизированном управлении (рис.1.1, б) часть операций технологического процесса осуществляется механизмами управления без участия человека. В этом случае сигналы преобразователей о нарушении технологического процесса принимаются не только приборами сигнализации, но и сервомеханизмами. Последние, воздействуя самостоятельно на механизмы управления, могут остановить действие рабочего органа или всей машины. На долю человека приходится работа по устранению неисправности и повторного запуска машины в работу

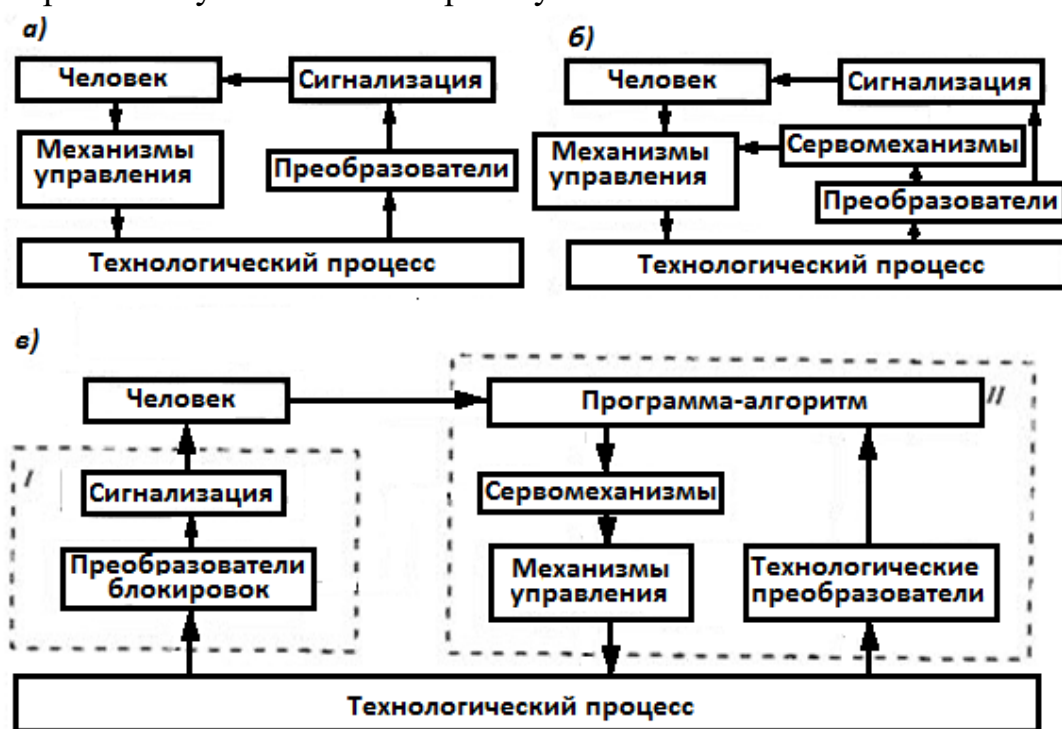


Рис. 1.1 Структурная схема систем управления

Автоматическое управление (рис.1.1, в) предусматривает управление по командам преобразователей или программного механизма. Эта система состоит из двух основных частей: контролирующей и управляющей. При таком управлении человек занят только предварительной установкой определенной программы (алгоритма), устранением неполадок по сигналам преобразователей (регулировка и ремонт механизмов), а также пуском машины в работу или ее отключением. Так, в смесительных установках смеси различных марок готовятся каждая по своей технологии. Алгоритм технологического процесса для каждой марки смеси закладывается в память программного механизма, который и управляет последовательностью выполняемых операций от начала и до окончания каждого цикла в течение смены. При этом человек только устанавливает код требуемой программы управления для получения необходимой марки смеси. Запуск в работу и

остановка машины при той системе управления осуществляются в определенной последовательности: при пуске электрическая цепь каждого двигателя предыдущего рабочего органа машины может быть включена только после пуска электрической цепи двигателя последующего рабочего органа и наоборот — при отключении машины. Таким образом, рассмотренное управление технологическими процессами осуществляется системой автоматического управления (САУ), представляющей совокупность взаимодействующих между собой управляемого объекта и управляющего устройства без непосредственного участия человека и независимо от его квалификации. Автоматическое управление может быть местным и дистанционным и управлять работой одного или нескольких объектов (установок, машин, оборудования). Разновидностью автоматического управления является система автоматического регулирования (САР), поддерживающая постоянство или изменение по требуемому закону физической величины, характеризующей управляемый процесс. Здесь же следует отметить, что наряду с управлением и регулированием, в машинах используется и система автоматического контроля (САК) за состоянием объекта (узлов машины), за характером протекания технологического процесса или достижением предельных значений параметров как в машине и ее узлах, так и в готовой продукции (строительные материалы, сооружения).

Автоматизированное и автоматическое управление производственными процессами преимущественное распространение получило на предприятиях по изготовлению асфальтобетонных и цементобетонных смесей, а также при изготовлении серийных железобетонных изделий (плит, колонн, блоков и т. д.). Однако автоматизация все шире применяется в строительных и дорожных машинах при выполнении как отдельных операций, так и различных их комбинаций. В большой степени этому способствует широкий перевод большинства рассматриваемых машин на гидравлические, в основном объемные гидросистемы управления рабочими органами. В отличие от механических эти системы позволяют снизить металлоемкость, эффективней использовать возможности регулирования положения рабочих органов или самой машины в пространстве и обеспечить повышение качества выполняемых работ и производительности.

В соответствии с этим в настоящее время для землеройных (одноковшовые, многоковшовые, цепные экскаваторы и т. п.), землеройно-транспортных (скреперы, бульдозеры, автогрейдеры и т. п.) и дорожных (катки, асфальто- и бетоноукладчики) машин, а также для стреловых самоходных и башенных кранов, лифтов разработаны и внедряются микропроцессорные системы управления, регулирования, диагностики и безопасности.

При этом следует отметить особенности устройства и работы большого разнообразия и различного назначения строительных машин, которые должны быть положены в основу при разработке соответствующих систем управления. В строительных машинах, особенно в землеройно-транспортных и дорожных, необходимо управлять одновременно несколькими параметрами, такими как курс машины, продольный и поперечный уклон, оптимальная загрузка приводного двигателя при минимальном расходе топлива, подача и температура укладываемых материалов, осуществлять независимое регулирование в многоконтурных системах, компенсировать воздействия на объекты управления нагрузок от неровности поверхности земли и дороги, неоднородности разрабатываемой среды и распределяемых технологических материалов, температуры окружающего воздуха и скорости ветра, регулировать параметры в широком диапазоне времени (от долей секунды до нескольких часов) и т. д.

Большое распространение в строительстве получают роботы и различные манипуляторы. Под манипулятором понимают механизм, осуществляющий под управлением оператора действия, аналогичные действиям руки человека. Строительный манипулятор не имеет в своей системе управления никаких вычислительных устройств. Однако для обеспечения ориентационного управления (т. е. точного позиционирования) в состав строительного манипулятора могут входить различные информационно-измерительные устройства (лазерные, телевизионные, радиоанализаторные). Строительный робот — это манипулятор с системой автоматического управления, программирование которым осуществляется посредством специальной рукоятки управления.

## 1.2. Основные термины и определения автоматизации

Разработка автоматизированных производств, отдельного автоматизированного оборудования осуществляется на базе теории автоматического управления - ТАУ.

**ТАУ** — это совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющих спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ), отвечающую требованиям по качеству её работы.

При описании отдельных элементов ТАУ и системы в целом применяется определенная терминология.

**САУ** – **система автоматического управления** – совокупность технических средств по управлению величиной регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специального технического устройства - автоматического регулятора,

программируемого контроллера или компьютера. Основной частью (узлом, элементом) САУ является объект управления.

**Объект управления** – это техническая установка, оборудование, машина, предприятие в которой управляют (регулируют) с помощью специальных технических средств.

**Технологические параметры** – это физико-химические величины, характеризующие состояние технологического процесса в объекте управления. Например: температура, давление, скорость вращения и др.

**Регулируемый параметр** – это технологический параметр, величиной которого управляют с помощью специальных технических средств. Число регулируемых параметров, как правило, значительно меньше общего числа технологических параметров.

**Параметры состояния объекта** – выходные величины, объективные показатели объекта в заданный момент времени, измеряемые в определенных физических (температура, килограммы, скорость, момент и др.) или относительных (доли, проценты, баллы и т.п.) единицах.

**Управление объектом** – это процесс воздействия на объект с целью достижения показателей состояния заданных значений в определенный момент времени.

**Цель управления** – достижение необходимого состояния объекта, заданного величинами его параметров, например, температуры охлаждающей жидкости в двигателе или скорости движения машины. Цель управления в данный момент времени считается достигнутой, если достигнуты заданные значения параметров состояния объекта управления.

**Система ручного регулирования (СРР)** – это совокупность технических средств по управлению величиной регулируемого параметра, в которой вычислительные и логические операции осуществляются человеком-оператором.

**Воздействия** – факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Они могут быть возмущающие и управляющие.

**Возмущающие воздействия** носят случайный, трудно предсказуемый характер. Например, температура наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др.

**Управляющие воздействия** – это воздействия на объект управления, организуемые техническим устройством или человеком-оператором с целью компенсации влияния возмущающих воздействий.

**Сигналы** – совокупность потоков энергии или вещества, поступающих или выходящих из объекта управления, возмущающие и управляющие воздействия, а также регулируемый параметр.

По направлению различают входные и выходные сигналы объекта управления. Воздействия, возмущающие и управляющие, будут *входными* сигналами для объекта управления.

Регулируемый параметр в ТАУ всегда принимают за *выходной* сигнал объекта управления, даже если он физически никуда за пределы объекта не выходит. Например, температура в топке котла, уровень материала в бункере, напряжение на обмотках электродвигателя и др. В ТАУ любой сложности объект изображают в виде простого прямоугольника. Основой управления является переработка информации о состоянии объекта в соответствии с целью управления. Управление может осуществляться человеком или специальным техническим устройством. Управление, осуществляемое без участия человека, называется *автоматическим*, с участием человека – *автоматизированным*.

### 1.3. Конструкторская документация - схемы систем автоматики

При разработке, изготовлении и эксплуатации САУ и ее составляющих применяют единую систему конструкторской документации – комплекс стандартов, который определяет состав, правила разработки, оформления и обращения конструкторской документации.

Конструкторская документация – это графические и текстовые документы, которые в совокупности или в отдельности определяют состав и устройство САУ и содержат всю информацию, необходимую для ее разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Конструкторская документация чертежная – это графическая документация, состоящая из чертежей пяти видов. Чертеж детали содержит ее изображение и информацию, необходимую для ее изготовления и контроля. Сборочный чертеж содержит изображение и информацию сборочной единицы – нескольких сопряженных деталей, необходимую для ее сборки и контроля. Чертеж общего вида определяет конструкцию всего изделия, взаимодействие его основных частей и поясняет принцип действия.

Электромонтажный чертеж содержит информацию, необходимую для электрического монтажа САУ или ее части. Монтажный чертеж содержит контурное (упрощенное) изображение САУ, а также информацию для его установки на месте использования.

Схемы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки и эксплуатации изделия.

Схемы предназначены:

- на этапе проектирования - для определения структуры будущего изделия;

- на этапе производства - для ознакомления с конструкцией изделия, разработки технологических процессов изготовления, монтажа и контроля изделия;
- на этапе эксплуатации - для определения неисправностей, ремонта и технического обслуживания изделия.

В соответствии с Государственным стандартом схемы и их буквенные обозначения в зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия (установки), подразделяют на виды, представленные в таблице 1.1

*Таблица 1.1 Виды схем*

| №  | Вид схемы                      | Обозначение |
|----|--------------------------------|-------------|
| 1  | электрические                  | Э           |
| 2  | гидравлические                 | Г           |
| 3  | пневматические                 | П           |
| 4  | газовые (кроме пневматических) | Х           |
| 5  | кинематические                 | К           |
| 6  | вакуумные                      | В           |
| 7  | оптические                     | Л           |
| 8  | Энергетические                 | Р           |
| 9  | деления                        | Е           |
| 10 | комбинированные                | С           |

В зависимости от основного назначения схемы подразделяют на типы, представленные в таблице 1.2. Каждому типу схем присваивается цифровое обозначение.

Все схемы по видам делятся на: **электрические, гидравлические, пневматические, кинематические и комбинированные**. Электрики пользуются в основном электрическими схемами. Однако в зависимости от характера электрической установки (различные приводы, линии) в дополнение к электрическим схемам иногда составляют схемы других видов, например кинематические. Если они служат для лучшего понимания электрической схемы, то допускается схемы обоих видов изображать на одном чертеже.

Основными рабочими схемами и чертежами являются: структурные, функциональные и принципиальные схемы автоматизации, схемы внешних электрических и трубных проводок, общие виды щитов и пультов, монтажные схемы щитов и пультов, планы расположения средств автоматизации и электрических и трубных проводок (чертежи трасс).

Схемы подразделяют на семь типов: **структурные, функциональные, принципиальные, соединений (монтажные), подключений (схемы внешних соединений), общие и расположения.**

*Таблица 1.2. Типы электрических схем*

| Тип схемы                  | Обозначение |
|----------------------------|-------------|
| структурные                | 1           |
| функциональные             | 2           |
| принципиальные<br>(полные) | 3           |
| соединений<br>(монтажные)  | 4           |
| подключения                | 5           |
| общие                      | 6           |
| расположения               | 7           |
| объединенные               | 0           |

Полное наименование схемы определяется видом и типом схемы.

Например, схема электрическая принципиальная - ЭЗ, схема электрогидропневмокинематическая принципиальная (комбинированная) - СЗ; схема электрическая соединений и подключения (объединенная) - ЭО.

Дополнительно к схемам или вместо схем (в случаях, установленных правилами выполнения конкретных видов схем) в виде самостоятельных документов выпускают таблицы, которые содержат сведения о расположении устройств, соединениях, местах подключения и другую информацию. Таким документам присваивают код, состоящий из буквы Т и кода соответствующей схемы. Например, код таблицы соединений к электрической схеме соединений ТЭ4. Таблицы соединений записывают в спецификацию после схем, к которым они выпущены, или вместо них.

**Структурная схема** разрабатывается на начальных стадиях проектирования и предшествует разработке схем других типов. Структурная схема— это наиболее простая разновидность отображения будущей автоматизированной схемы. Такое отображение формируется на начальном этапе разработки, реализуется в формате эскиза и отображает общий состав будущего комплекса автоматизированных средств. Внешне выглядит как прямоугольники и фигуры с другой геометрией, соединенные стрелками. Внутри этих фигур располагаются их обозначения.

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи между ними. Схема отображает принцип действия изделия в самом общем виде.

Действительное расположение составных частей на структурной схеме не учитывают и способ связи не раскрывают. Построение схемы должно давать наглядное представление о:

- составе изделия;
- последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии.

Функциональные части на схеме изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений. При изображении функциональных частей в виде прямоугольников их наименования, типы и обозначения вписывают внутрь прямоугольников.

Направление хода процесса, происходящего в изделии, обозначают стрелками, соединяющими функциональные части. На схемах простых изделия функциональные части располагают в виде цепочки в соответствии с ходом рабочего процесса в направлении слева направо. Схемы, содержащие несколько основных рабочих каналов, рекомендуется вычерчивать в виде параллельных горизонтальных строк.

На рис.1.2 приведена структурная схема автоматической системы регулирования теплоснабжения и горячего водоснабжения (ГВС) здания.

Система содержит следующие функциональные части:

1. узел учета тепловой энергии, с помощью которого определяется количество потребленной тепловой энергии и расхода горячей воды,
2. система регулирования отопления, предназначенная для поддержания заданной температуры и давления теплоносителя (воды) в контуре отопления, заданной температуры воздуха в помещениях здания.
3. система регулирования ГВС, предназначенная для поддержания необходимой температуры и давления горячей воды,
4. система электроснабжения всех блоков автоматической системы регулирования,
5. персональный компьютер.

Особенностью этой схемы является то, что на ней показаны не только связи между отдельными блоками системы регулирования, но и направление потоков теплоносителя и горячей воды.

При большом количестве функциональных частей в изделии элементы структурной схемы могут обозначаться порядковыми номерами. При этом должен быть составлен перечень этих функциональных частей. В этом случае наглядность структурной схемы ухудшается, т.к. роль каждой функциональной части выясняется не только по изображению, но и с помощью перечня.

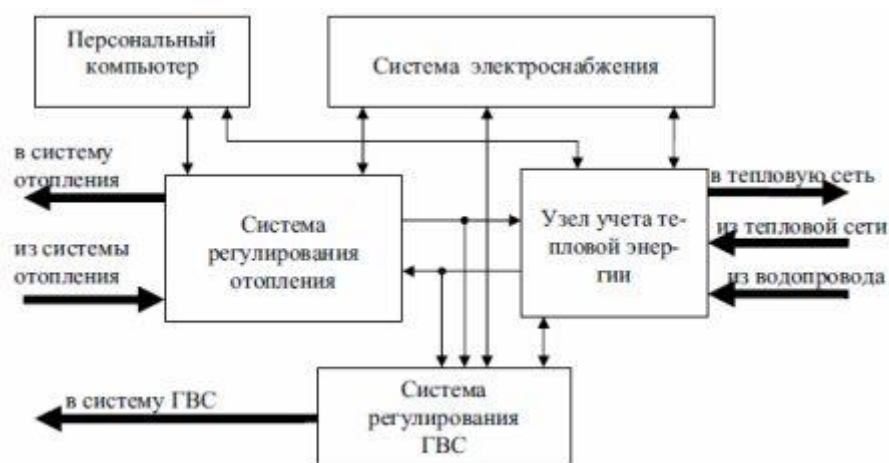


Рис. 1.2. Структурная схема автоматической системы регулирования теплоснабжения и горячего водоснабжения

Для примера исполнения этого варианта на рис. 1.3 приведена структурная схема системы стабилизации скорости вращения электродвигателя.



Рис.1.3. Структурная схема системы стабилизации скорости вращения электродвигателя

**Функциональная.** Этот вариант схемы автоматизации является общепринятым во всем мире. Особенность такого типа отображения заключается в том, что он показывает не только структуру автоматизируемого технологического процесса, но и содержит описание параметров работы технических средств. Функциональная схема автоматизации является основным технологическим документом, определяющим функциональную структуру и объем автоматизации технологических процессов. Представляет собой чертеж, на котором условными обозначениями совмещены и изображены два «слоя» (рис. 1.4):

- **технологический** - объекты управления (т. е. технологические установки, аппараты, агрегаты и т. п.) и связывающие их коммуникационные потоки (по сути, это материальные потоки). Формируется на основе схемы материальных потоков и их информационных переменных;
- **автоматизации** - средства автоматизации (датчики, приборы, вычислительные устройства, промышленные контроллеры и компьютеры и т.

п.) с указанием связей между ними и технологическим оборудованием, а также связей между отдельными элементами автоматики. Формируется на основе структурной схемы САУ.

Технологическое оборудование и оборудование для перемещения материальных потоков изображают упрощенно (контурно, без второстепенных конструктивных деталей, чтобы оно было «узнаваемо»), но с учетом взаимного расположения с приборами и средствами автоматизации.

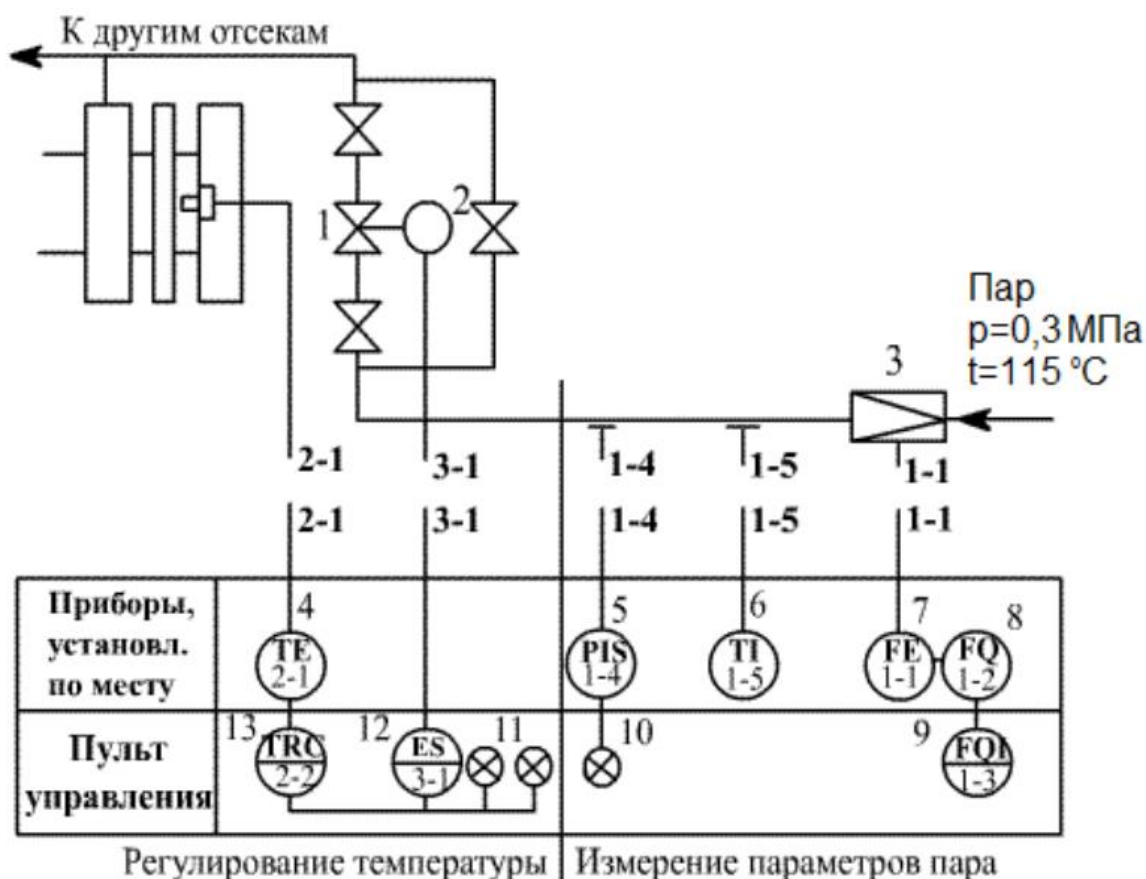


Рис. 1.4. Упрощенная функциональная схема автоматизации тепловлажностной обработки бетонных изделий в кассетных установках:

1-клапан; 2-исполнительный механизм; 3-редуктор расхода пара; 4-преобразователь температуры в электрический сигнал TE; 5-манометр электроконтактный PIS, обеспечивающий сигнализацию при отсутствии минимально допустимого давления пара в магистрали; 6-термометр электроконтактный TI, показывающий температуру пара в магистрали; 7-преобразователь расхода пара FE в электрическую величину; 8-интегратор расхода пара FQ; 9-показывающий прибор расхода пара FQI за установленный интервал времени; 10, 11-сигнальные лампы; 12-преобразователь электрического сигнала ES в сигнал включения электромагнитного клапана; 13-регулятор температуры бетона с ее регистрацией TRC

На функциональных схемах в «слое» автоматизации показывают отборные устройства (которые можно назвать чувствительными элементами измерительных устройств), измерительные преобразователи, преобразующие и регулирующие приборы, вычислительные устройства, линии связи, переключатели, аппаратуру управления, исполнительные устройства, регулирующие механизмы (органы), элементы индикации и сигнализации, различные согласующие устройства и устройства обработки информации (рис.1.5).

Простейшие вспомогательные устройства, такие как реле, источники питания, выключатели и предохранители в цепях питания; соединительные коробки и другие устройства, монтажные элементы, на функциональных схемах не показывают. Для сложных производственных процессов с большим объемом автоматизации функциональные схемы могут быть выполнены раздельно, например: схемы автоматического управления, контроля, сигнализации.

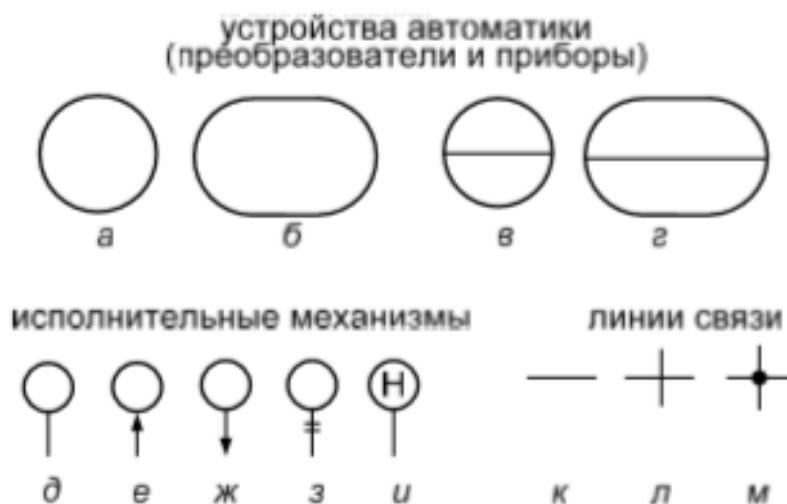


Рис. 1.5. Обозначение элементов функциональных схем автоматизации

Ключевыми на рис. 1.5 являются два устройства: **а** — устанавливаемое по месту, **в** - устанавливаемое на пульте, в щите. Следует помнить, что практически все первичные преобразователи (датчики) располагаются по месту, а вторичные преобразователи, устройства отображения и регулирования - в щитах и пультах. Их отличие - присутствие или наличие линии диаметра, делящего круг пополам.

Устройства имеют форму круга, который условно можно разделить на две равные зоны (рис. 1.6):

- нижняя зона 1 - указывается позиция и позиционное обозначение устройства. Состоит из двух частей: цифрового обозначения, присваиваемого комплекту (функциональной группе приборов), и цифровых индексов, присваиваемых отдельным элементам, входящим в комплект. Существует альтернативный вариант нумерации отдельных элементов - буквенными индексами (строчными буквами русского алфавита). Например, 1-1

(альтернативный вариант 1а), что означает: первый комплект, первое устройство; 1-2 (альтернативный вариант 1б), что означает: первый комплект, второе устройство и т. д. Одинаковым комплектам или однотипным элементам одного комплекта присваивают одинаковые позиции независимо от места их установки;

- верхняя зона 2 - при помощи буквенных условных обозначений (по ГОСТ 2.404-85) указывается переменная (П) и функция (Ф) устройства.

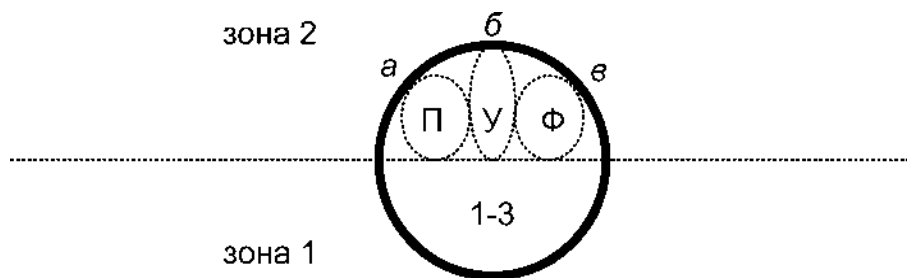


*Рис. 1.6. Зоны и поля заполнения устройств, устанавливаемых по месту и в щите или на пульте*

Буквенные условные обозначения устройств располагают в следующем порядке слева направо (рис. 1.6, зона 2, поля: *а*, *б* и *в*):

а) обозначение основной измеряемой величины (**Переменная**);

б) обозначение, уточняющее, если это необходимо (!), основную измеряемую величину (**Уточнение**);

в) обозначение или обозначения функционального признака или признаков прибора (**Функция**).

**Обозначение основной измеряемой величины.** Измеряемые величины (технологические переменные) обозначают следующими буквами (основное обозначение букв): *D*- плотность; *E*- любая электрическая величина; *F*- расход; *G*- размер, положение, перемещение; *H*- ручное воздействие; *K*- время или временная программа; *L*- уровень; *M*- влажность; *P*- давление или вакуум; *Q*- величина, характеризующая качество (состав, концентрацию и т. п.); *R*- радиоактивность; *S*- скорость или частота; *T*- температура; *U*- несколько разнородных измеряемых величин; *V*- вязкость; *W*- масса; *X* - нерекомендуемая резервная буква.

**Обозначение, уточняющее, если это необходимо, основную измеряемую величину.** Дополнительные значения при использовании в качестве второй по порядку буквы в обозначении прибора имеют следующие буквы: *D*- разность или перепад; *F*- соотношение (доля, дробь); *J*- автоматическое переключение или обегание; *Q*- интегрирование (суммирование по времени).

Кроме того, часть букв, имеющих дополнительное значение, используется для уточнения типа приборов: *E* - первичное преобразование (чувствительный

элемент); **К**- станция управления; **Т** - промежуточное преобразование (дистанционная передача); **У**- преобразование, вычислительные функции.

Буква **Е** применяется для обозначения устройств, осуществляющих первичное преобразование сигналов (датчиков); **Т**- для обозначения приборов с дистанционной передачей показаний. Например, бесшкальных, **К**- для обозначения приборов, имеющих станцию управления, т. е. переключатель для выбора вида управления (автоматическое - ручное) и устройство для дистанционного управления; **У**- для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

Обычно на первом месте ставится буква, обозначающая измеряемую величину, а на втором месте - одна из дополнительных букв **Е**, **Т**, **К** или **У**. Например, датчики расходомеров - **FE**; бесшкальные манометры с дистанционной передачей показаний - **PT**; бесшкальные расходомеры с дистанционной передачей - **FT** и т. д.

В качестве буквы, имеющей дополнительное значение, применяют: **Н** - верхний предел измеряемой величины; **Л**- нижний предел измеряемой величины. Буквы **Н** и **Л** наносят вне графического обозначения (справа от него). Для конкретизации измеряемой величины (рис. 1.7) справа от изображения прибора необходимо указать наименование или символ измеряемой величины, например: напряжение, сила тока, **pH**, **O<sub>2</sub>** и т. п. Для обозначения дополнительных значений **D**, **F**, **Q** допускается применение строчных букв **d**, **f**, **q**.

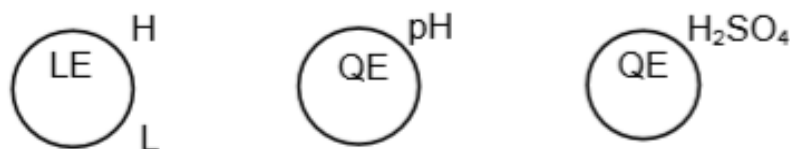


*Рис. 1.7. Конкретизация измеряемой технологической переменной: первичный преобразователь уровня с верхней (High) и нижней (Low)*

Обозначение функционального признака или признаков прибора. При обозначении функций, выполняемых прибором, для отображения информации используют буквы: **I** – показание; **R**– регистрация, для формирования выходного сигнала; **C** – регулирование или управление; **S** – включение (отключение или переключение); **A** – сигнализация. Если в одном приборе функциональных признаков несколько, то порядок расположения буквенных обозначений должен быть следующим: **I R C S A**.

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств применяют надписи, расшифровывающие вид преобразования или операции, выполняемые вычислительными устройствами. Их наносят справа от графического обозначения приборов. Для обозначения рода энергии сигнала используются буквы: **Е**– электрический; **Р**–

пневматический; G– гидравлический. Виды форм сигнала обозначают: А – аналоговый; D – дискретный

***Обозначение промышленных контроллеров (PLC) и рабочих станций SCADA систем.***

Промышленные контроллеры (PLC) и операторские станции SCADA-систем (системы диспетчерского управления) изображают с помощью прямоугольников. Их располагают в нижней части поля схемы в одном или нескольких горизонтальных рядах с указанием в каждом прямоугольнике соответствующего наименования.

При использовании агрегатированных комплексов (промышленные контроллеры) и управляющих машин (рабочие станции SCADA-систем) допускается, кроме общего наименования, приводить наименование их отдельных блоков и функций. При этом прямоугольник, изображающий комплекс (машину), делят горизонтальными линиями на части, число которых соответствует количеству блоков (модулей) или функций.

Для промышленного контроллера (в прямоугольнике указывается его тип, например, Siemens, Omron, GE Fanuc, Allen-Bradley и т. п.) таким делением является наличие аналоговых (Analog) и дискретных (Discrete) модулей ввода (Input) и вывода (Output). Таким образом, возможны следующие варианты модулей: AI (аналоговый ввод), AO (аналоговый вывод), DI (дискретный ввод), DO (дискретный вывод) с уточнением конкретного типа модуля для соответствующего контроллера. Взаимосвязь между модулями ввода и вывода (т. е. реализацию обратной связи) показывают условной штрихпунктирной линией, точно так же, как и обратную связь на структурной схеме системы автоматического управления.

При обозначении функций, осуществляемых операторскими станциями SCADA-систем (указывается ее конкретная программная реализация, например, InTouch, iFix, Genesis, WinCC, TraceMode и т. п.), целесообразно использовать те же буквы, что и при обозначении функциональных признаков приборов автоматизации: I – показание; R – регистрация; С – регулирование или управление; S – включение (отключение или переключение); А – сигнализация – и отмечать их наличие на мнемосхеме SCADA-системы соответствующим знаком (точкой).

На рис. 1.8 показаны примеры схем автоматизации с применением промышленных контроллеров (PLC) и рабочих станций SCADA-систем.

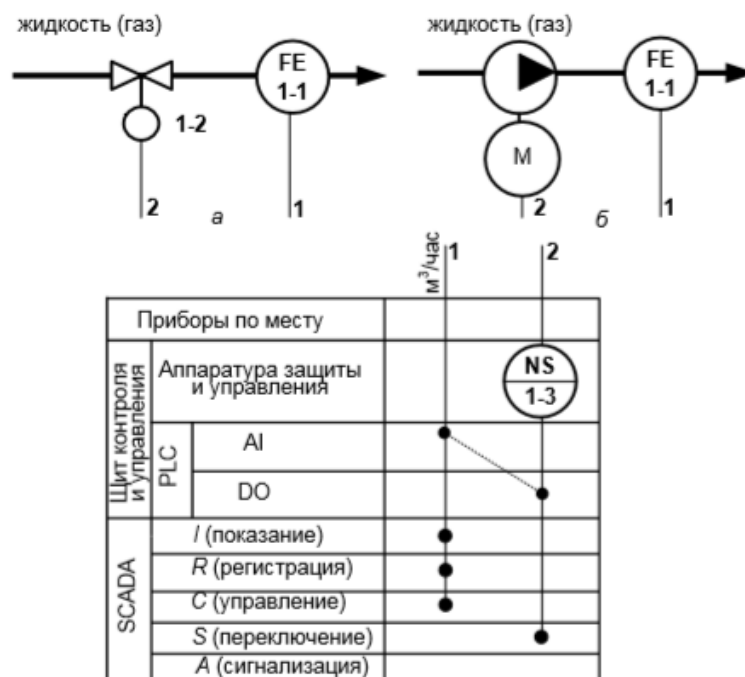


Рис. 1.8. Функциональные схемы систем автоматического регулирования (стабилизации) расхода жидкости (газа) на основе промышленного контроллера и рабочей станции SCADA-системы при помощи изменения: а - проходного сечения вентиля; б - числа оборотов насоса (частотное)

**Схема принципиальная (полная)** - схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия (установки) (рис. 1.9).

Схемами принципиальными пользуются для изучения принципов работы изделий (установок), а также при их наладке, контроле и ремонте. Они служат основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений (монтажных) и чертежей

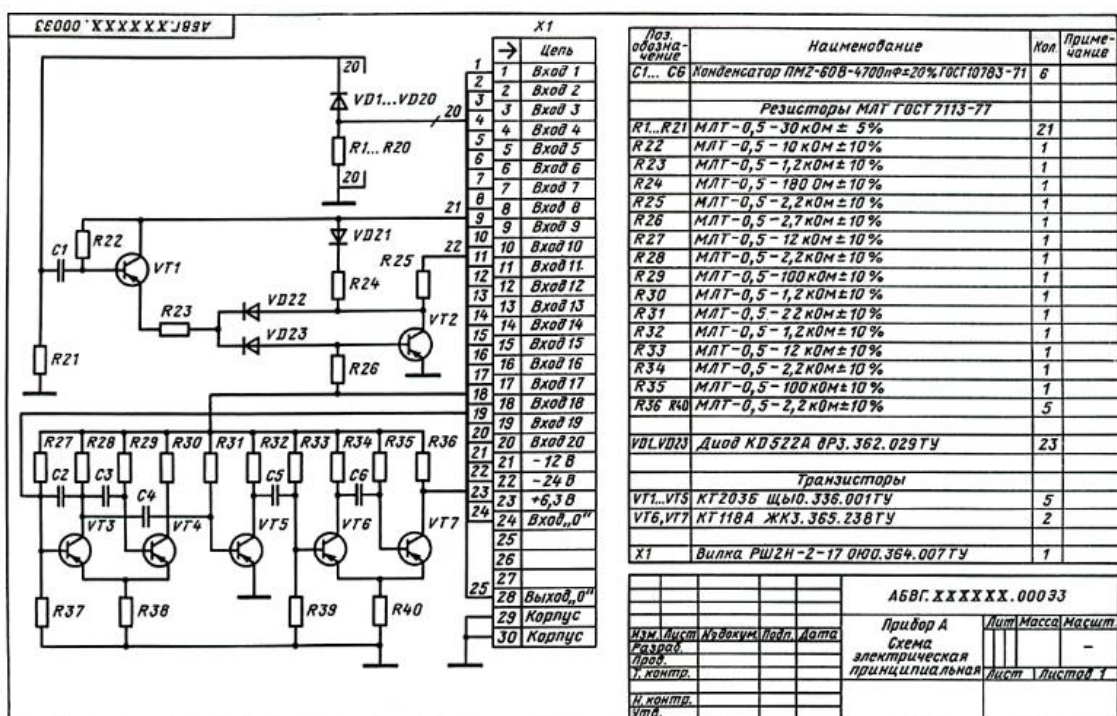


Рис.1.9 Схема электрическая принципиальная (полная) (ЭЗ)

**Схема соединений (монтажная)** - схема, показывающая соединения составных частей изделия (установки) и определяющая провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединений и ввода (разъемы, платы, зажимы и т.п.) (рис.1.10). Схематическими соединениями (монтажными) пользуются при разработке других конструкторских документов, в первую очередь, чертежей, определяющих прокладку и способы крепления проводов, жгутов, кабелей или трубопроводов в изделии (установке), а также для осуществления присоединений и при контроле, эксплуатации и ремонте изделий (установок).

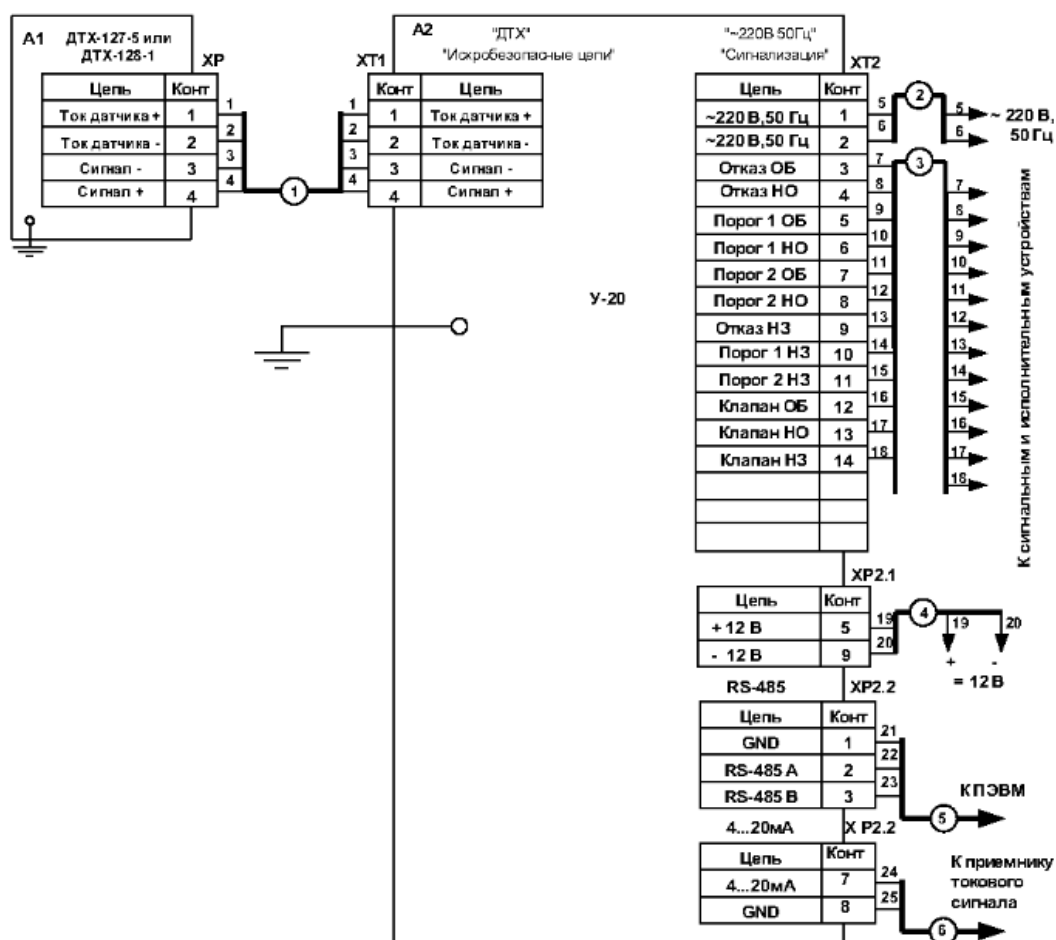


Рис.1.10. Схема электрическая соединений (монтажная) (Э4)

**Схема подключения** - схема, показывающая внешние подключения изделия. Схематическими подключениями пользуются при разработке других конструкторских документов, а также для осуществления подключений изделий и при их эксплуатации.

На схеме подключения должны быть изображены изделие, его входные и выходные элементы (соединители, зажимы и т.д.) и подводимые к ним концы проводов и кабелей (многожильных проводов, электрических шнуров) внешнего монтажа, около которых помещают данные о подключении изделия (характеристики внешних цепей и (или) адреса). Размещение изображений входных и выходных элементов внутри графического обозначения изделия должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии. На схеме следует указывать позиционные обозначения входных и выходных элементов, присвоенные им на принципиальной схеме изделия (рис. 1.11).

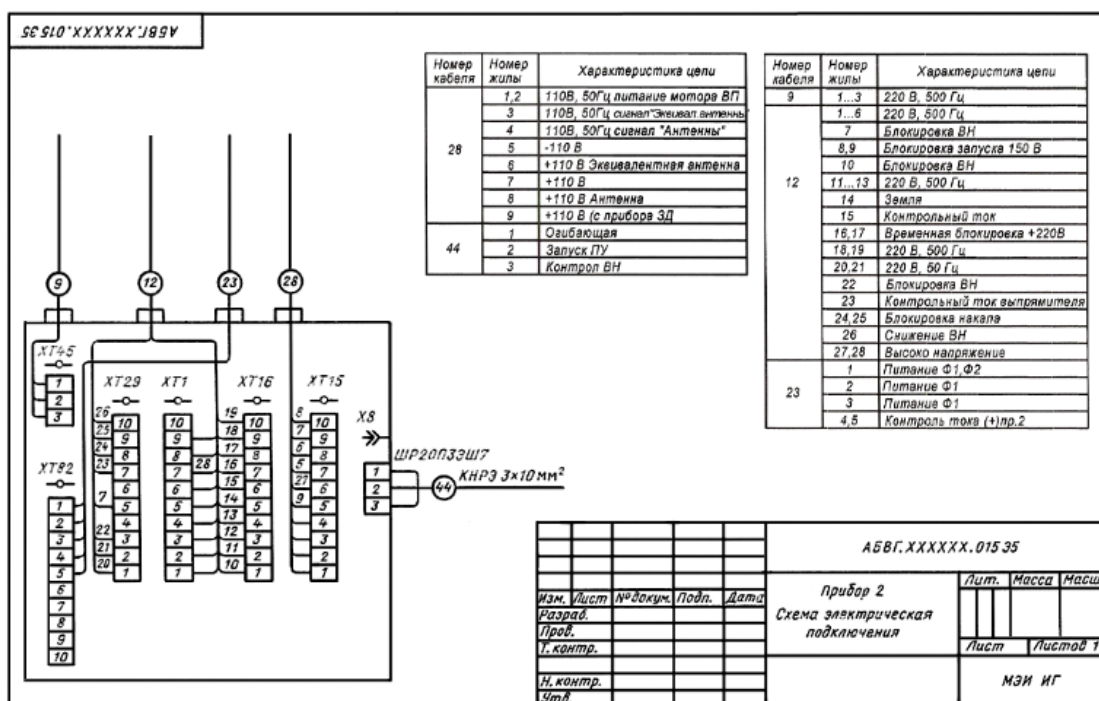


Рис.1.11. Схема подключения (Э5)

**Схема общая** - схема, определяющая составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации.

Схемами общими пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации. Схему общую на сборочную единицу допускается разрабатывать при необходимости. На общей схеме изображают устройства и элементы, входящие в комплекс, а также провода, жгуты и кабели (многожильные провода, электрические шнуры), соединяющие эти устройства и элементы. Расположение графических обозначений устройств и элементов на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению элементов и устройств в изделии (рис.1.12).



Схемами расположения пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при эксплуатации и ремонте изделий (установок) (рис.1.13).

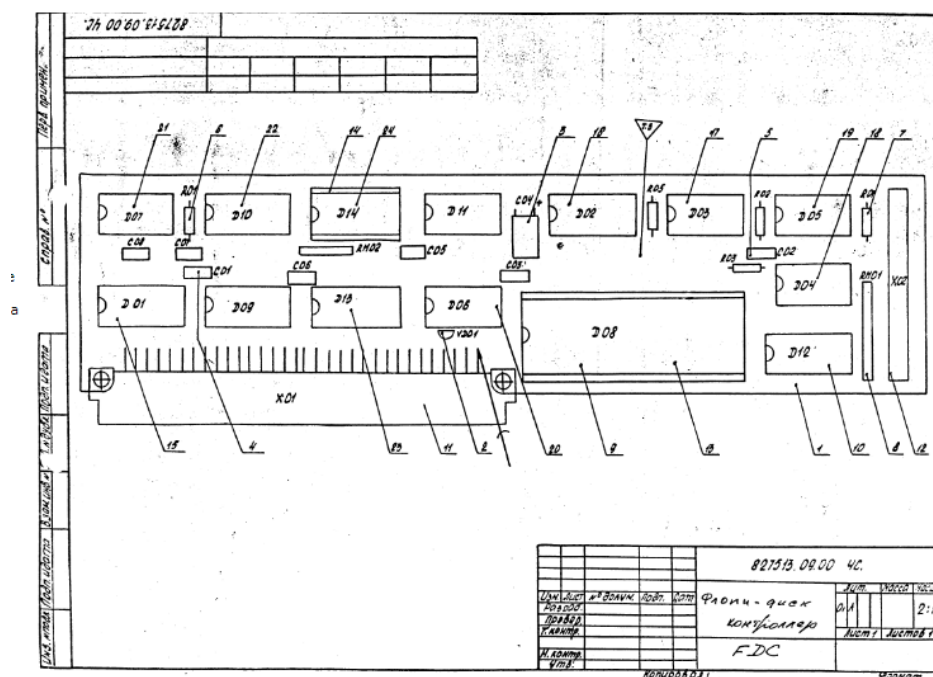


Рис. 1.14. Схема электрическая расположения деталей (Э7)

**Схема объединенная** - схема, когда на одном конструкторском документе выполняют схемы двух или нескольких типов, выпущенных на одно изделие (установку) (рис.1.15).

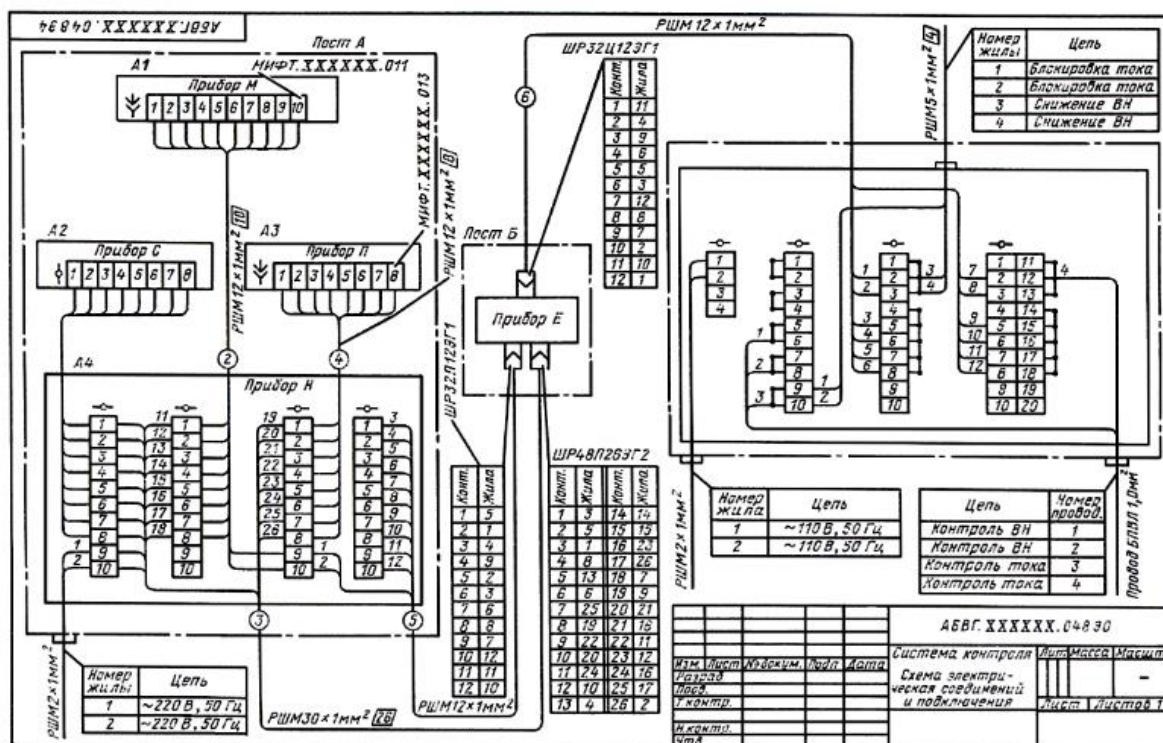


Рис.1.15. Схема электрическая объединенная (Э0)

Конструкторская документация текстовая – документация, которую выполняют рукописным (печатным) способом на листах формата А4 согласно установленным формам. Спецификация определяет составные части сборочной единицы, комплекса или комплекта. Перечень элементов принципиальной схемы устанавливает ее состав. Технические условия (ТУ) содержат требования к САУ

Пояснительная записка содержит словесное описание САУ, а также обоснование принятых во время разработки технических решений. Ведомости включают перечни составных элементов: ведомость спецификаций, ведомость покупных изделий, ведомость ссылочных документов, а также ведомости технического предложения, эскизного и технического проектов. Эксплуатационная конструкторская документация предназначена для изучения САУ и правил ее эксплуатации; содержит техническое описание, инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию, паспорт, ведомость запасных изделий и т.п.

### ***Контрольные вопросы к главе 1.***

1. Дайте определение автоматики.
2. Дайте определение автоматизации производственного процесса.
3. В чем различие между механизацией процесса и автоматизацией?
4. Механизированные, комплексно-механизированные и автоматизированные виды работ.
5. Частичная, комплексная и полная автоматизацию.
6. Подсистемы автоматизации
7. Системы управления
8. Что такое манипулятор?
9. Дайте определение ТАУ.
10. Дайте определение САУ.
11. Дайте определение объекта управления.
12. Дайте определение технологического параметра.
13. Что такое управление объектом?
14. Назовите виды воздействий на объект управления.
15. Чем отличается автоматизированный процесс от автоматического?
16. Что такое уровень автоматизации производства?
17. Дайте определение конструкторской документации.
18. Дайте определение конструкторской документации чертежной
19. Назовите составляющие чертежной конструкторской документации.
20. Что содержит электромонтажный чертеж?
21. Что содержит монтажный чертеж?
22. Дайте определение конструкторской документации схемной.
23. Дайте определение структурной схемы САУ.
24. Дайте определение принципиальной схемы.

25. Дайте определение функциональной схемы.
26. Дайте определение схемы соединений (монтажной).
27. Дайте определение схемы подключения.
28. Дайте определения общей схемы САУ.
29. Дайте определения текстовой конструкторской документации.

## Глава 2. Принципы построения САУ и режимы ее работы

### 2.1. Фундаментальные принципы управления

Принято различать четыре фундаментальных принципа управления: принцип разомкнутого управления, принцип компенсации, принцип обратной связи, принцип комбинированного управления

Одномерными называются системы с одной регулируемой величиной.

Многомерными называются системы с несколькими регулируемыми величинами, и они используются для управления многомерными объектами регулирования, нормальное функционирование которых требует изменения по заданному закону не менее двух физических величин.

Принцип разомкнутого управления. Рассмотрим САУ электропечи (рис.2.1). Ее принципиальная схема показывает принцип действия данной конкретной САУ, состоящей из конкретных технических устройств. Технология требует изменения температуры в печи по заданной временной программе, в частном случае требуется поддержание постоянной температуры.

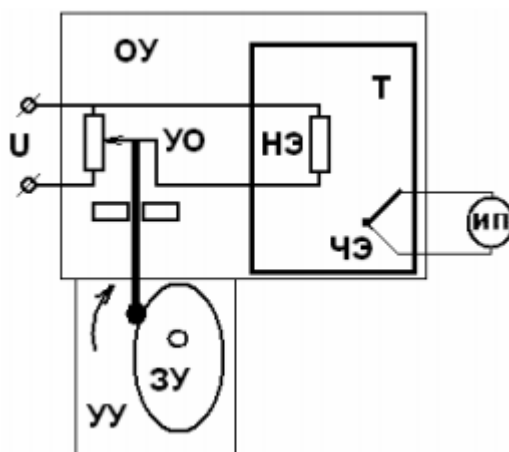


Рис. 2.1 – САУ электропечи:

*U* - напряжение электрической сети; *НЭ*- нагревательный элемент; *ОУ*- объект управления; *УО*- управляющий орган объекта (реостат); *ЗУ*- задающее устройство; *УУ*- устройство управления; *ИП*- измерительный прибор; *ЧЭ*- чувствительный элемент; *Т*- температура в печи.

Для этого надо реостатом регулировать напряжение на нагревательном элементе *НЭ*. Подобная часть *ОУ*, с помощью которой можно изменять параметры управляемого процесса, называется управляющим органом объекта (*УО*). Это может быть реостат, вентиль, заслонка и т.п. Часть *ОУ*, которая преобразует управляемую величину в пропорциональную ей

величину, удобную для использования в САУ, называют чувствительным элементом (ЧЭ). Физическую величину на выходе ЧЭ называют выходной величиной ОУ. Как правило, это электрический сигнал (ток, напряжение) или механическое перемещение. В качестве ЧЭ могут использоваться термопары, тахометры, рычаги, электрические мосты, датчики давления, деформации, положения и т.п. В нашем случае это термопара, на выходе которой формируется напряжение, пропорциональное температуре в печи, подаваемое на измерительный прибор ИП для контроля. Физическую величину на входе управляющего органа ОУ называют входной величиной ОУ. Управляющее воздействие  $u(t)$  – это воздействие, прикладываемое к УО объекта с целью поддержания требуемых значений управляемой величины. Оно формируется устройством управления (УУ). Ядром УУ является исполнительный элемент, в качестве которого могут использоваться электрические двигатели, мембраны, электромагниты и т.п. Задающим устройством (ЗУ) называется устройство, задающее программу изменения управляющего воздействия, то есть формирующее задающий сигнал  $u_0(t)$ . В простейшем случае  $u_0(t) = U$  – постоянная величина. ЗУ может быть выполнено в виде отдельного устройства, быть встроенным в УУ или же вообще отсутствовать. В качестве ЗУ может выступать кулачковый механизм, магнитофонная лента, маятник в часах, задающий профиль и т.п. Роль УУ и ЗУ может исполнять человек. Однако это уже не САУ. В нашем примере УУ является кулачковый механизм, перемещающий движок реостата согласно программе, которая задается профилем кулачка. Рассмотренную САУ можно представить в виде функциональной схемы, элементы которой называются функциональными звеньями. Эти звенья изображаются прямоугольниками, в которых записывается функция преобразования входной величины в выходную (рис.2.2). Эти величины могут иметь одинаковую или различную природу, например, входное и выходное электрическое напряжение, или электрическое напряжение на входе и скорость механического перемещения на выходе и т.п.

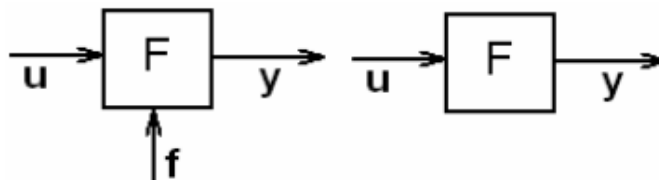


Рис. 2.2 – Функция преобразования входной величины  $u$  в выходную  $y$ .

Величина  $f$ , подаваемая на второй вход звена, называется возмущением. Она отражает влияние на выходную величину  $y$  изменений окружающей среды, нагрузки и т.п.

В общем случае функциональное звено может иметь несколько входов и выходов (рис.2.3). Здесь  $u_1, u_2, \dots, u_n$  – входные (управляющие) воздействия;  $f_1, f_2, \dots, f_k$  – возмущающие воздействия;  $y_1, y_2, \dots, y_m$  – выходные величины.

Принцип работы функциональных звеньев может быть различным, поэтому функциональная схема не дает представление о принципе действия конкретной САУ, а показывает лишь пути прохождения и способы обработки и преобразования сигналов. Сигнал – это информационное понятие, соответствующее на принципиальной схеме физическим величинам. Пути его прохождения указываются направленными отрезками (рис.2.4). Точки разветвления сигнала называются узлами. Сигнал определяется лишь формой изменения физической величины, он не имеет ни массы, ни энергии, поэтому в узлах он не делится (рис. 2.4а), и по всем путям от узла идут одинаковые сигналы, равные сигналу, входящему в узел. Суммирование сигналов осуществляется в сумматоре (рис. 2.4б), вычитание - в сравнивающем устройстве, рис 2.4в.

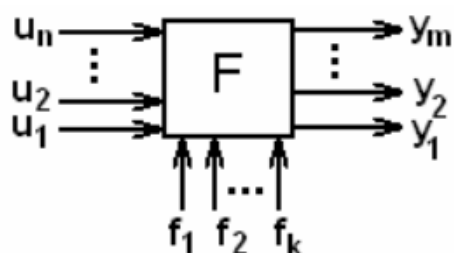


Рис. 2.3 – Функциональное звено с несколькими входами и выходами

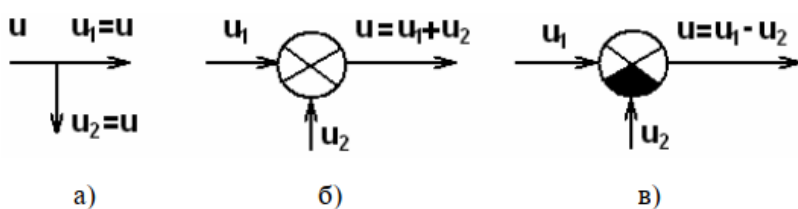


Рис. 2.4 – Прохождение сигнала по узлам САУ: а – ветвление; б – суммирование; в – вычитание.

САУ печи можно изобразить функциональной схемой (рис.2.5). В данной схеме заложен принцип разомкнутого управления, сущность которого состоит в том, что программа управления во времени  $t$  жестко задана ЗУ; управление не учитывает влияние возмущений на параметры процесса.

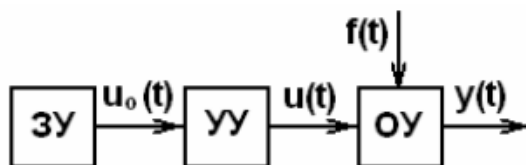


Рис. 2.5 – Функциональная схема САУ хлебопекарной печи.

Примерами систем, работающих по принципу разомкнутого управления, являются часы, магнитофон, компьютер и т.п.

**Принцип компенсации.** Если возмущающий фактор искажает выходную величину до недопустимых пределов, то применяют принцип компенсации (рис.2.6, КУ - корректирующее устройство). Пусть  $u_0$  - значение выходной

величины, которое требуется обеспечить согласно программе. На самом деле из-за возмущения  $f$  на выходе регистрируется значение  $y$ . Величина

$$\varepsilon = y_0 - y$$

называется отклонением от заданной величины. Если каким-то образом удастся измерить величину  $f$ , то можно откорректировать управляющее воздействие  $u$  на входе ОУ, суммируя сигнал УУ с корректирующим воздействием, пропорциональным возмущению  $f$  и компенсирующим его влияние. Примеры систем компенсации: биметаллический маятник в часах, компенсационная обмотка машины постоянного тока и т.п.

На рис.2.6 в цепи нагревательного элемента НЭ стоит термосопротивление  $R_t$ , величина которого меняется в зависимости от колебаний температуры окружающей среды, корректируя напряжение на НЭ. Достоинство принципа компенсации: быстрота реакции на возмущения. Он более точен, чем принцип разомкнутого управления. Недостаток – невозможность учета подобным образом всех возможных возмущений.

*Принцип обратной связи.* Наибольшее распространение в технике получил принцип обратной связи (рис.2.7). Здесь управляющее воздействие корректируется блоком КУ в зависимости от выходной величины  $y$ . И уже не важно, какие возмущения действуют на ОУ.

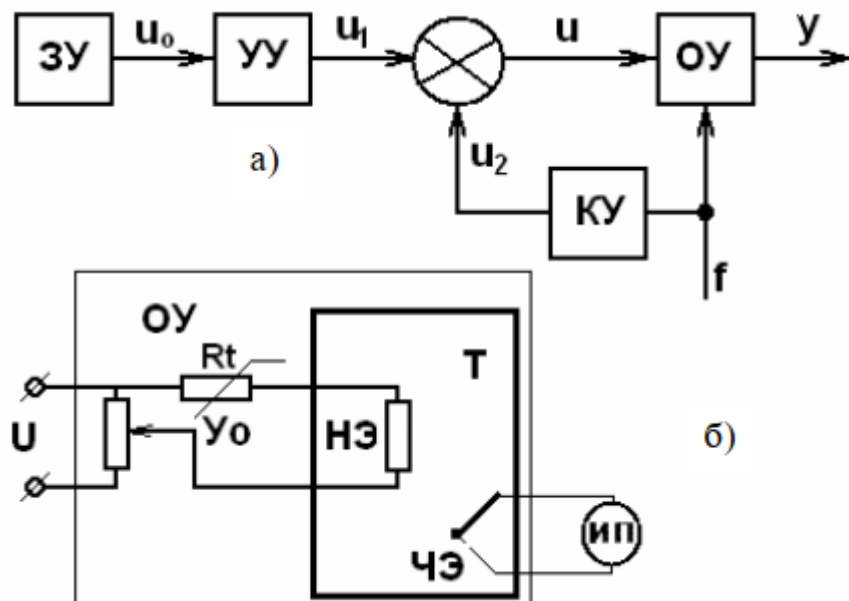


Рис. 2.6 – САУ с компенсацией возмущающего сигнала:  
а – функциональная схема; б – САУ электропечи

Если значение  $y$  отклоняется от требуемого, то происходит корректировка сигнала  $u$  с целью уменьшения данного отклонения. Связь выхода ОУ с его входом называется главной обратной связью (ОС). В частном случае (рис.2.8) ЗУ формирует требуемое значение выходной величины  $y_0$ , которое сравнивается с действительным значением на выходе САУ  $y$ . Отклонение

$$\varepsilon = y_0 - y$$

с выхода сравнивающего устройства подается на вход регулятора  $P$ , объединяющего в себе УУ, УО, ЧЭ. Если  $\varepsilon \neq 0$ , то регулятор формирует управляющее воздействие  $u$ , действующее до тех пор, пока не обеспечится равенство  $\varepsilon = 0$ , или  $y = y_0$ . Так как на регулятор подается разность сигналов, то такая обратная связь называется отрицательной в отличие от положительной обратной связи, когда сигналы складываются.

Такое управление в функции отклонения называется регулированием, а подобную САУ называют системой автоматического регулирования (САР). Так, на рис. 2.9 изображена упрощенная схема САР электропечи. Роль ЗУ здесь выполняет потенциометр, напряжение на котором  $U_z$  сравнивается с напряжением на термопаре  $U_t$ . Их разность  $U$  через усилитель  $Ус$  подается на исполнительный двигатель ИД, регулирующий через редуктор положение движка реостата в цепи НЭ. Наличие усилителя говорит о том, что данная САР является системой непрямого регулирования, так как энергия для функций управления берется от посторонних источников питания в отличие от систем прямого регулирования, в которых энергия берется непосредственно от ОУ, как, например, в САР уровня воды в баке (рис.2.10)

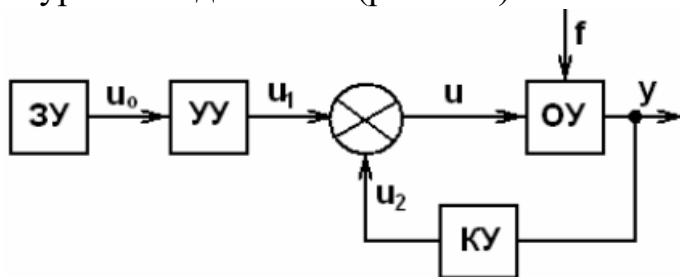


Рис. 2.7 – САУ с обратной связью

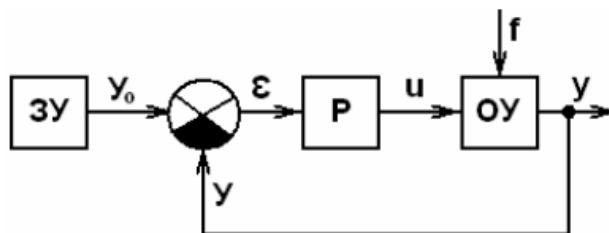


Рис. 2.8 – САУ с обратной связью по отклонению выходной величины от заданной.

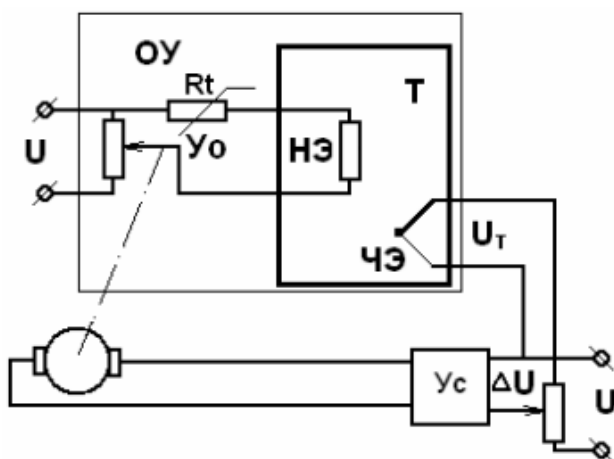


Рис. 2.9 – Упрощенная схема САР печи с регулятором

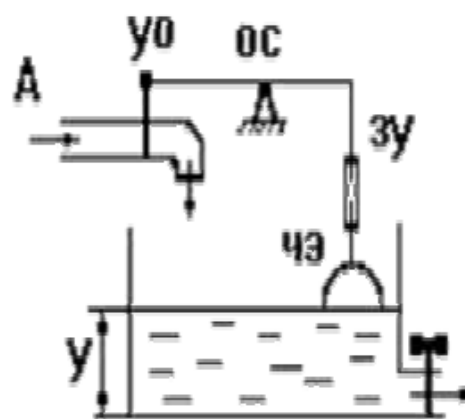


Рис. 2.10 – САР уровня воды в баке.

Для поддержания постоянного уровня воды в баке  $Y$  используется чувствительный элемент ЧЭ в виде поплавка, постоянно находящегося на ее поверхности. При увеличении расхода воды  $Q$  ее уровень  $Y$  начинает понижаться. Поплавок ЧЭ перемещается вниз и через тягу ЗУ (задающее устройство) и рычаг ОС (отрицательная обратная связь) воздействует на управляющий орган УО (заслонка), который увеличивает подачу воды  $A$  в бак. Увеличение подачи  $A$  приводит к поднятию уровня  $Y$  воды в баке. В результате чего поплавок поднимается и закрывает заслонку УО. Подача воды уменьшается, и уровень воды стабилизируется вокруг заданного уровня, изменяемого длиной тяги ЗУ. Недостатком принципа обратной связи является инерционность системы. Поэтому часто применяют комбинацию данного принципа с принципом компенсации (принцип комбинированного регулирования), что позволяет объединить достоинства обоих принципов: быстроту реакции на возмущение принципа компенсации и точность регулирования независимо от природы возмущений принципа обратной связи (рис. 2.11).

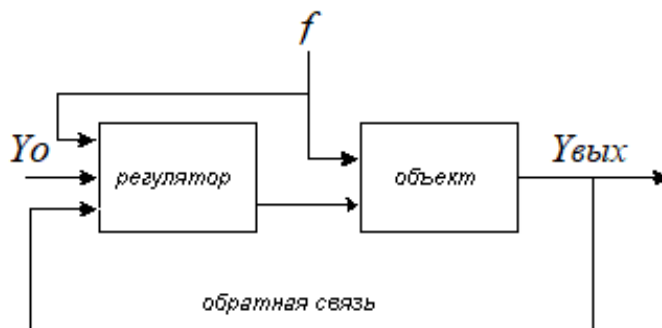


Рис. 2.11 – САР, работающая по принципу комбинированного регулирования

**Обратная связь** – это связь, по которой информация о состоянии ОУ (контролирующее воздействие, соответствующее действительному значению управляемой величины) передается с выхода системы на ее вход.

Обратные связи подразделяются:

1. отрицательные и положительные;
2. жесткие и гибкие;
3. местные и главные.

Если воздействие обратной связи, поступающее на вход системы, по знаку совпадает со знаком задающего воздействия, то ее называют *положительной*, в противном случае связь определяют как *отрицательную*.

Если передаваемое воздействие зависит только от выходной величины и не зависит от времени – *связь считают жесткой*. Жесткие обратные связи, действуют как в установившемся, так и в переходном режиме.

Обратная связь, оказывающая влияние на работу системы только в переходном процессе (режиме), называется *гибкой*. Такие связи реагируют на приращение воздействий, поступающих на вход системы. Те из них, что реагируют на производные от воздействий, называются *дифференцирующими гибкими связями*, а те, которые реагируют на интегралы от воздействий, называются *интегрирующими обратными гибкими связями*.

Если обратная связь соединяет выход системы с ее входом, то ее называют *главной*, а остальные же обратные связи называют *местными*.

Все звенья основной цепи, охваченные главной обратной связью, образуют основной замкнутый контур. САУ, содержащие только одну главную обратную связь, называются *одноконтурными*. Автоматические системы, содержащие дополнительные обратные или дополнительные прямые связи, называются *многоконтурными*.

Такие связи служат для улучшения регулировочных свойств отдельных элементов или их групп, соединяя выход элемента, или группы с соответствующим входом. Такие связи, кроме названия местные именуют *корректирующими*. Местные и главные связи могут быть как жесткими, так и гибкими.

В случае размыкания главной обратной связи система, работающая по замкнутому циклу, переходит в режим работы по разомкнутому циклу. В случае же размыкания местной обратной связи система продолжает работать по заложенному в нее циклу.

## 2.2. Основные виды САУ

В зависимости от принципа и закона функционирования ЗУ, задающего программу изменения выходной величины, различают основные виды САУ:

- стабилизации;

- программные;
- следящие;
- самонастраивающиеся:
  - экстремальные;
  - оптимальные;
  - адаптивные;
- интеллектуальные САУ.

В *системах стабилизации* (рис.2.9, 2.10) обеспечивается неизменное значение управляемой величины при всех видах возмущений, т.е.  $y = const$ . ЗУ формирует эталонный сигнал, с которым сравнивается выходная величина. ЗУ, как правило, допускает настройку эталонного сигнала, что позволяет менять по желанию значение выходной величины.

В *программных системах* обеспечивается изменение управляемой величины в соответствии с программой, формируемой ЗУ. В качестве ЗУ может использоваться кулачковый механизм, устройство считывания с перфоленты или магнитной ленты и т.п.

К этому виду САУ можно отнести заводные игрушки, магнитофоны, проигрыватели и т.п. Различают системы с временной программой (например, рис.2.1), обеспечивающие  $y = f(t)$ , и системы с пространственной программой, в которых  $y = f(x)$ , применяемые там, где на выходе САУ важно получить требуемую траекторию в пространстве, например, в копировальном станке (рис.2.12), закон движения во времени здесь роли не играет, где  $t$  – время,  $x$  – координата точки.

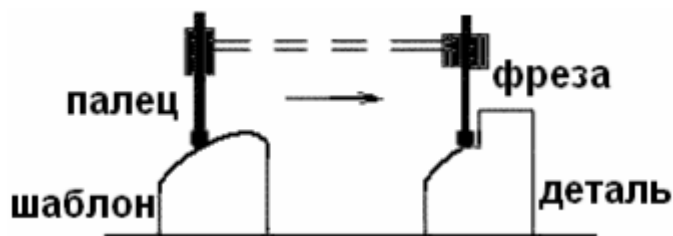


Рисунок 2.12 – САУ с пространственной программой.

*Следящие системы* отличаются от программных лишь тем, что программа  $y = f(t)$  или  $y = f(x)$  заранее неизвестна. В качестве ЗУ выступает устройство, следящее за изменением какого-либо внешнего параметра. Эти изменения и будут определять изменения выходной величины САУ. Например, рука робота, повторяющая движения руки человека. Все три рассмотренных вида САУ могут быть построены по любому из трех фундаментальных принципов управления. Для них характерно требование совпадения выходной величины с некоторым предписанным значением на входе САУ, которое само может меняться. То есть в любой момент времени требуемое значение выходной величины определено однозначно. В *самонастраивающихся системах* ЗУ ищет такое значение управляемой

величины, которое по какому-то критерию (или нескольким) является оптимальным. Так, в экстремальных системах (рис.2.13) требуется, чтобы выходная величина всегда принимала минимальное или максимальное значение из всех возможных, которое заранее не определено и может непредсказуемо изменяться. Для его поиска система выполняет небольшие пробные движения и анализирует реакцию выходной величины на эти пробы.

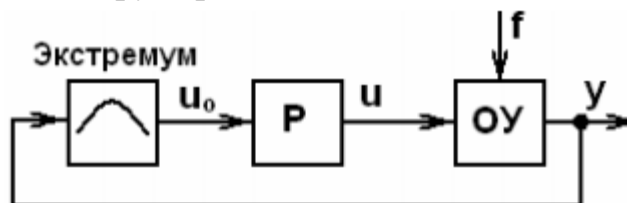


Рисунок 2.13 – Самонастраиваемая САУ.

После этого вырабатывается управляющее воздействие, приближающее выходную величину к экстремальному значению. Процесс повторяется непрерывно. Так как в данных САУ происходит непрерывная оценка выходного параметра, то они выполняются только в соответствии с третьим принципом управления – принципом обратной связи. *Оптимальные* системы являются более сложным вариантом экстремальных систем. Здесь происходит, как правило, сложная обработка информации о характере изменения выходных величин и возмущений, о характере влияния управляющих воздействий на выходные величины, может быть задействована теоретическая информация, информация эвристического характера и т.п. Поэтому основным отличием экстремальных систем является наличие в них ЭВМ. Эти системы могут работать в соответствии с любым из трех фундаментальных принципов управления. В *адаптивных* системах предусмотрена возможность автоматической перенастройки параметров или изменения принципиальной схемы САУ с целью приспособления ее к изменяющимся внешним условиям.

#### *Интеллектуальные САУ*

*ИСАУ* — это системы, которые позволяют проводить обучение, адаптацию или настройку за счет запоминания и анализа информации о поведении объекта, его СУ и внешних воздействий. Особенностью данных систем является наличие базы данных машины логического вывода, подсистемы объяснений и др.

*База знаний* — формализованные правила в виде логических формул, таблиц и т. п. ИСАУ используется для управления плохо формализованными или сложными техническими объектами.

*Класс ИСУ соответствует признакам:*

- Наличие взаимодействий СУ с реальным внешним миром с использованием информационных каналов связи.
- Открытость системы — нужна для пополнения и приобретения знаний.

- Наличие механизмов прогноза изменений среды функционирования системы.
- Неточность информации об ОУ может быть компенсирована за счет повышения интеллектуализации алгоритма управления.
- Сохранение функционирования при разрыве связи.

Если ИСАУ удовлетворяет всем 5-ти признакам, то она интеллектуальна в «большом», иначе в «маленьком» смысле.

#### Контрольные вопросы к главе 2.

1. Что называется системой автоматического управления?
2. Что является основной задачей автоматического управления?
3. Что называется управляемой величиной?
4. Что называется управляющим органом?
5. Что называется чувствительным элементом?
6. Что такое входная и выходная величины?
7. Что называется управляющим воздействием?
8. Что называется возмущением?
9. Что называется отклонением от заданной величины?
10. Что называется управляющим устройством?
11. Что называется задающим устройством?
12. Виды обратной связи?
13. В чем отличие сигнала от физической величины?
14. В чем суть принципа разомкнутого управления?
15. В чем суть принципа компенсации?
16. В чем суть принципа обратной связи?
17. Принцип комбинированного управления?
18. Перечислите достоинства и недостатки принципов управления?
19. Какой частный случай управления называется регулированием?
20. В чем отличие систем прямого и непрямого регулирования?
21. Дайте определение многоконтурной системы.
22. Дайте определение САУ стабилизации.
23. Дайте определение программной САУ.
24. Дайте определение следящей САУ.
25. Дайте определение самонастраивающейся САУ.
26. Интеллектуальные системы автоматического управления?

## Глава 3. Режимы работы САУ

### 3.1. Статические режимы работы САУ

#### 3.1.1 Статические характеристики

Режим работы САУ, в котором управляемая величина и все промежуточные величины не изменяются во времени, называется установившимся, или статическим, режимом. Любое звено и САУ в целом в данном режиме описывается уравнениями статики вида  $y = F(u, f)$ , в которых отсутствует время  $t$ . Соответствующие им графики называются статическими характеристиками. Статическая характеристика звена с одним входом  $u$  может быть представлена кривой  $y = F(u)$  (рис.3.1а). Если звено имеет второй вход по возмущению  $f$ , то статическая характеристика задается семейством кривых  $y = F(u)$  (рис.3.1б), при различных значениях  $f_j$ , или  $y = F(f)$  при различных  $u_j$  (рис.3.1в).

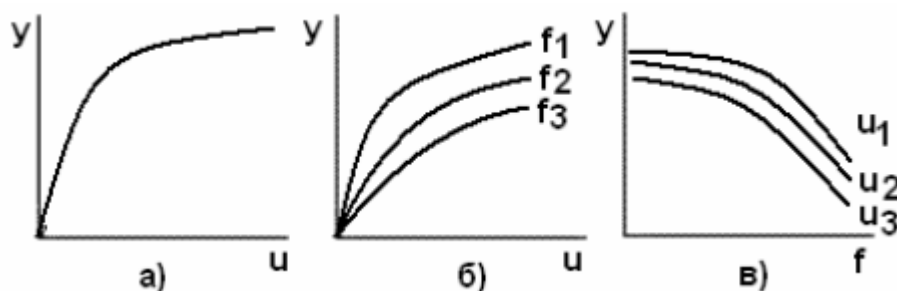


Рис. 3.1 – Статическая характеристика звена с одним входом  $y = F(u)$

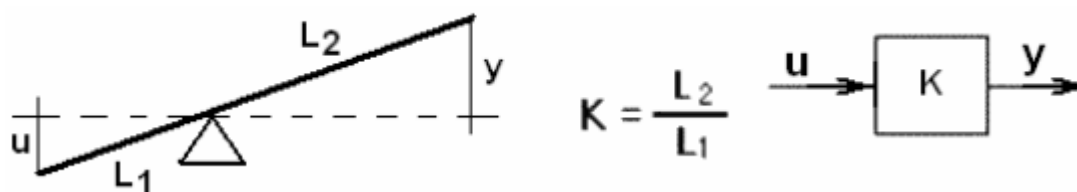


Рис. 3.2 – Рычаг - функциональное звено системы регулирования воды в баке

Так, примером одного из функциональных звеньев системы регулирования воды в баке (рис. 2.10) является обычный рычаг (рис.3.2.). Уравнение статики для него имеет вид  $y = Ku$ . Его можно изобразить звеном, функцией которого является усиление (или ослабление) входного сигнала в  $K$  раз. Коэффициент  $K = y/u$ , равный отношению выходной величины к входной, называется коэффициентом усиления звена. В случае, когда входная и выходная величины имеют разную природу, его называют коэффициентом передачи. Статическая характеристика данного звена имеет вид отрезка прямой линии с наклоном  $\alpha = \arctg (L_2/L_1) = \arctg (K)$  (рис.3.3.). Звенья с линейными статическими характеристиками называются линейными.

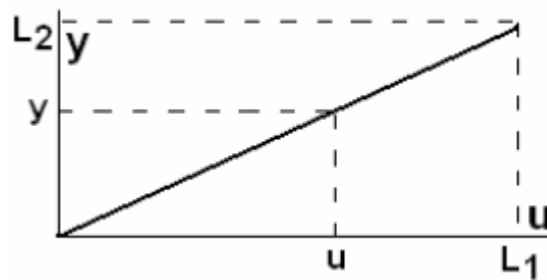


Рис. 3.3 – Статическая характеристика рычага.

Статические характеристики реальных звеньев, как правило, нелинейны. Такие звенья называются нелинейными. Для них характерна зависимость коэффициента передачи от величины входного сигнала:  $K = \Delta y / \Delta u \neq const$ . Например, статическая характеристика генератора постоянного тока представлена на рис.3.4. Обычно нелинейная характеристика не может быть выражена какой-либо математической зависимостью и ее приходится задавать таблично или графически.

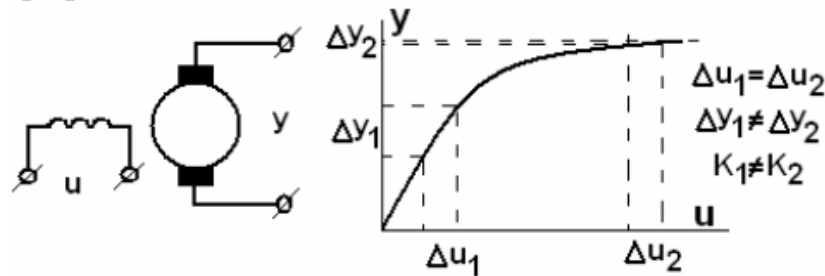


Рис. 3.4 – Статическая характеристика генератора постоянного тока.

Зная статические характеристики отдельных звеньев, можно построить статическую характеристику САУ. Если все звенья САУ линейные, то САУ имеет линейную статическую характеристику и называется линейной. Если хотя бы одно звено нелинейное, то САУ - нелинейная. Звенья, для которых можно задать статическую характеристику в виде жесткой функциональной зависимости выходной величины от входной, называются статическими. Если такая связь отсутствует и каждому значению входной величины соответствует множество значений выходной величины, то такое звено называется астатическим. Изображать его статическую характеристику бессмысленно. Примером астатического звена может служить двигатель, входной величиной которого является напряжение  $U$ , а выходной - угол поворота вала, величина которого при  $U = const$  может принимать любые значения. Выходная величина астатического звена даже в установившемся режиме является функцией времени.

В общем случае САУ представляет различные комбинации соединений динамических звеньев. Существуют три основных типа соединений звеньев: последовательное, параллельное и с обратной связью (рис. 3.5)

Для получения результирующей статической характеристики системы, состоящей из ряда звеньев, необходимо решить систему алгебраических уравнений, которыми описывается работа звеньев, или найти ее графическим способом.

При последовательном соединении нескольких направленных звеньев выходной величиной  $y$  системы является выходная величина последнего звена, а входной величиной  $x$  — входная величина первого звена.

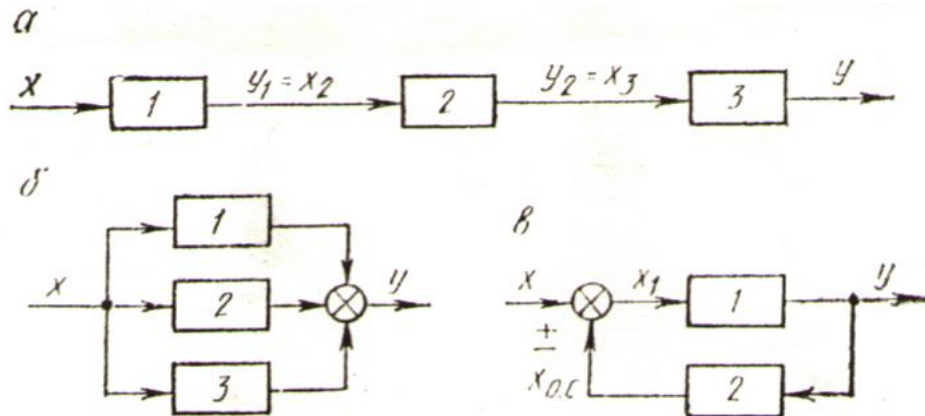


Рис.3.5. Схема соединений звеньев: а – последовательная, б – параллельное, в – с обратной связью.

Изобразим в 1 - 3-м квадратах (рис. 3.6а) статические характеристики 1 – 3-го звеньев:

$y_1 = f_1(x)$ ,  $y_2 = f_2(x_2)$  и  $y_3 = f_3(x_3)$ , а в квадрате 4 построим результирующую характеристику  $y = \varphi(x)$  последовательного соединения звеньев. Для нахождения точек этой характеристики задаемся некоторым значением  $x$  (например, точка  $a$ ). Затем строим прямоугольник, одна из сторон которого проходит через точку  $a$ , стороны его параллельны координатным осям, а вершины (точки 1; 2; 3) лежат на характеристиках звеньев. Четвертая вершина (точка 4) определяет точку искомой статической характеристики. Аналогично находим точки 5, 6, 7, 8 для значения  $x$ , соответствующего точке  $b$ . Соединив полученные точки, получаем искомую статическую характеристику системы  $y = \varphi(x)$

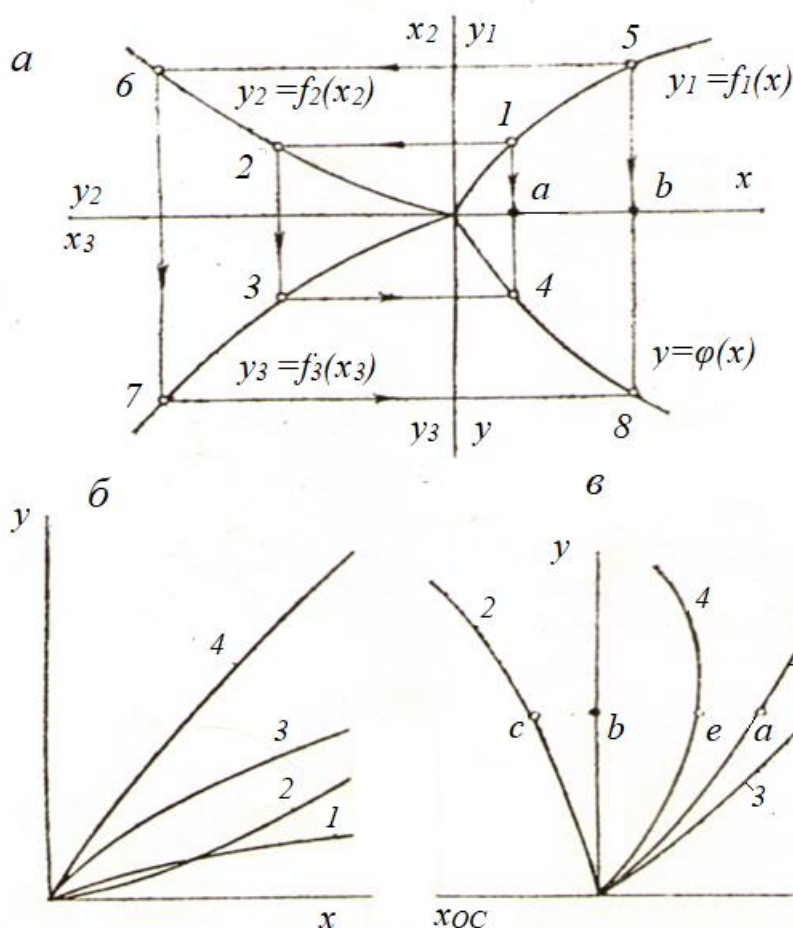


Рисунок 3.6. Графическое построение результирующей статической характеристики соединений звеньев: а – последовательного, б – параллельного, в – с обратной связью.

В случае последовательного соединения двух звеньев в 3-м квадранте строим биссектрису координатного угла. Если число последовательно соединенных звеньев больше трех, предварительно звенья группируются по два или три расположенных друг за другом звена и для этих групп строятся частные результирующие характеристики, а затем по ним строится результирующая характеристика системы.

Если кривые 1, 2, 3 (рис. 3.6б) являются статическими характеристиками 1—3-го звеньев, соединенных параллельно, результирующая характеристика такой системы  $y = \varphi(x)$  (кривая 4) находится путем суммирования ординат заданных кривых 1, 2 и 3.

Для звена или системы с жесткой обратной связью:

$$y = f(x \pm x_{o.c.}) = f[x \pm \varphi(y)]$$

В этом выражении знак «минус» принимается для отрицательной обратной связи, знак «плюс» — для положительной.

В квадранте 1 (рис. 3.6в) строим статическую характеристику  $y_1 = f_1(x_1)$  звена 1, охватываемого обратной связью (кривая 1), а в квадранте 2 — статическую характеристику  $x_{o.c.} = \varphi(y)$  звена 2 обратной связи (кривая 2). Выбрав на кривой 1 точку а и проводя через нее линию, параллельную оси

абсцисс, получим точки  $c$  и  $b$  на кривой 2 и оси ординат. В случае отрицательной обратной связи точка  $d$  результирующей характеристики (кривая 3) системы находится из условия  $bd = ba + cb$ . Для положительной обратной связи точка  $e$  результирующей характеристики системы (кривая 4) находится из условия  $be = ba - cb$ .

Таким образом, введение отрицательной обратной связи (например, для придания системе следящего действия) делает результирующую статическую характеристику САУ более полой, при этом уменьшается коэффициент передачи, повышается точность системы. Положительная обратная связь делает результирующую характеристику более крутой, увеличивает коэффициент передачи.

### 3.1.2 . Статическое и астатическое регулирование

Если на управляемый процесс действует возмущение  $f$ , то важное значение имеет статическая характеристика САУ в форме  $y = F(f)$  при  $y_0 = const$ . Возможны два основных вида этих характеристик (рис.3.7.). В соответствии с тем, какая из двух характеристик свойственна для данной САУ (рис.3.7а), различают статическое (рис.3.7.б), и астатическое (рис.3.7.в), регулирование. Рассмотрим систему регулирования уровня воды в баке (рис.3.8). Возмущающим фактором является поток  $Q$  воды из бака. Пусть при  $Q = 0$  имеем  $y = y_0$ ,  $\varepsilon = 0$ . ЗУ системы настраивается так, чтобы вода при этом не поступала. При  $Q \neq 0$  уровень воды понижается ( $\varepsilon \neq 0$ ), поплавков опускается и открывает заслонку, в бак начинает поступать вода.

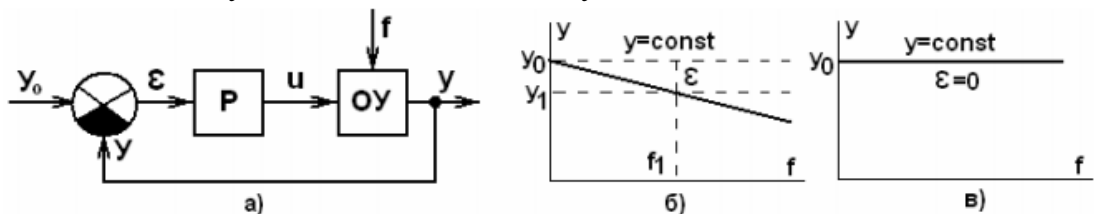


Рис. 3.7 – Статическое и астатическое регулирование в САУ.

Новое состояние равновесия достигается при равенстве входящего и выходящего потоков воды. Но в любом случае при  $Q \neq 0$  заслонка должна быть обязательно открыта, что возможно только при  $\varepsilon \neq 0$ . Причем, чем больше  $Q$ , тем при больших значениях  $\varepsilon$  устанавливается новое равновесное состояние.

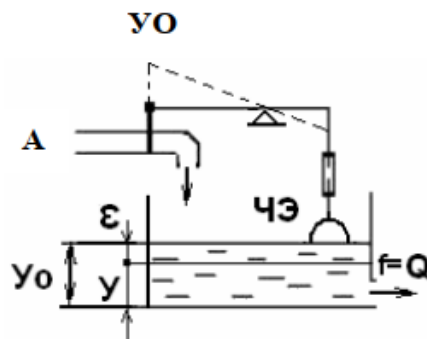


Рис. 3.8 – САУ регулирования воды в баке.

Статическая характеристика САУ имеет характерный наклон (рис.3.7б.). Это есть пример статического регулирования. Для получения статического регулирования все звенья САУ должны быть статическими. Статические регуляторы работают при обязательном отклонении  $\varepsilon$  регулируемой величины от требуемого значения. Это отклонение тем больше, чем больше возмущение  $f$ . Это заложено в принципе действия регулятора и не является его погрешностью, поэтому данное отклонение называется статической ошибкой регулятора. Чем больше коэффициент передачи регулятора  $K_p$ , тем на большую величину откроется заслонка при одних и тех же значениях  $\varepsilon$ , обеспечив в установившемся режиме большую величину потока  $Q$ . Это значит, что на статической характеристике одинаковым значениям  $\varepsilon$  при больших  $K_p$  будут соответствовать большие значения возмущения  $Q$ , статическая характеристика САУ пойдет более полого. Поэтому, чтобы уменьшить статическую ошибку, надо увеличить коэффициент передачи регулятора. Статизм  $d$  САУ показывает, насколько сильно значение регулируемой величины отклоняется от требуемого значения при действии возмущений, и равен тангенсу угла наклона статической характеристики, построенной в относительных единицах (рис.3.9.):

$$d = \operatorname{tg}(\alpha) = (y/y_n)/(f/f_n),$$

где  $y = y_n, f = f_n$  - точка номинального режима САУ. При достаточно больших значениях  $K_p$  имеем  $d \approx 1/K_p$ . В некоторых случаях статическая ошибка недопустима, тогда переходят к астатическому регулированию, при котором регулируемая величина в установившемся режиме принимает точно требуемое значение независимо от величины возмущающего фактора. Статическая характеристика астатической САУ не имеет наклона (рис.3.7в.). Возможные неточности относятся к погрешностям конкретной системы и не являются закономерными. Для того, чтобы получить астатическое регулирование, необходимо в регулятор включить астатическое звено, например ИД (исполнительный двигатель), между ЧЭ и УО (управляющий орган) (рис.3.10.). Если уровень воды понизится, то поплавков переместит движок потенциометра на величину  $\Delta L$ , за счет этого появится разность потенциалов  $\Delta \varphi \neq 0$  и ИД начнет поднимать заслонку до тех пор, пока  $\Delta \varphi$  не уменьшится до нуля, а это возможно только при  $y = y_0$ . При поднятии уровня

воды разность потенциалов сменит знак и двигатель будет вращаться в противоположную сторону, опуская заслонку

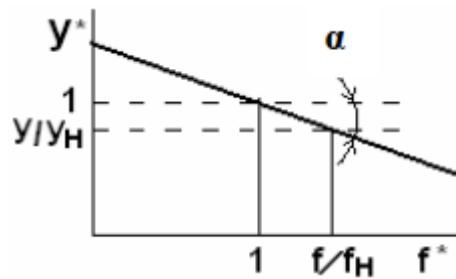


Рис. 3.9 – К понятию статизма  $d$

Достоинства и недостатки статического и астатического регулирования:  
 - статические регуляторы обладают статической ошибкой; - астатические регуляторы статической ошибки не имеют, но они более инерционны, сложны конструктивно и более дороги. Обеспечение требуемой статической точности регулирования является первой основной задачей при расчете элементов САУ.

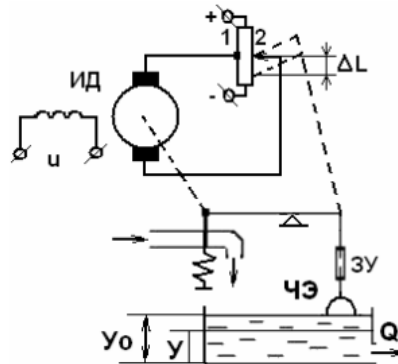


Рис. 3.10 – Регулирование воды в баке астатическим регулятором.

## 3.2. Динамический режим САУ

### 3.2.1 Уравнение динамики САУ

Установившийся режим не является характерным для САУ. Обычно на управляемый процесс действуют различные возмущения, отклоняющие управляемый параметр от заданной величины. Процесс установления требуемого значения управляемой величины называется регулированием. Ввиду инерционности звеньев регулирование не может осуществляться мгновенно. Рассмотрим САР, находящуюся в установившемся режиме, который характеризуется значением выходной величины  $y = y_0$ . Пусть в момент  $t = 0$  на объект воздействовал какой-либо возмущающий фактор, отклонив значение регулируемой величины  $y$ . Через некоторое время регулятор вернет САР к начальному состоянию (рис.3.11.). Если регулируемая величина изменяется во времени по аperiodическому закону, то процесс регулирования называется аperiodическим. При резких возмущениях

возможен колебательный затухающий процесс (рис.3.12а.). Существует и такая вероятность, что по истечении некоторого времени  $T_p$  в системе установятся незатухающие колебания регулируемой величины – незатухающий колебательный процесс (рис.3.12б.). Последний вид – расходящийся колебательный процесс (рис.3.12в.).

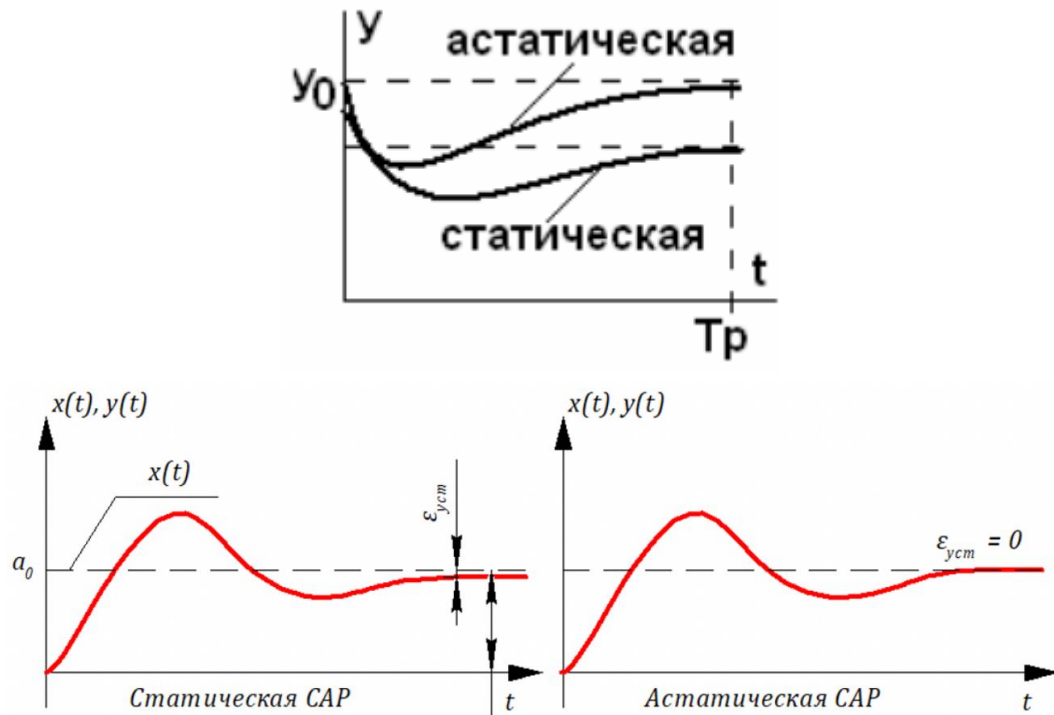


Рис. 3.11 – Динамика статических и астатических САР после возмущения и изменения входного воздействия

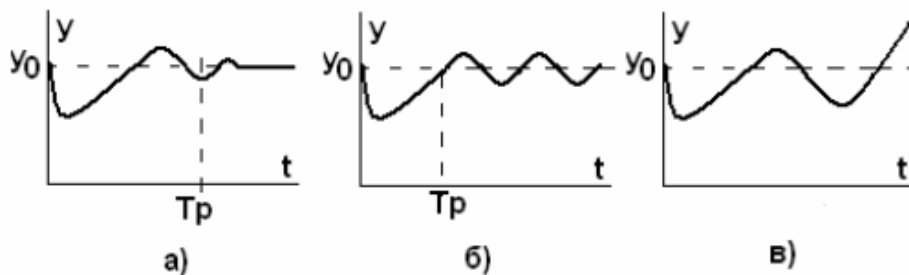


Рис. 3.12 – Колебательные процессы в САР.

Таким образом, основным режимом работы САУ считается динамический режим, характеризующийся протеканием в ней переходных процессов. Поэтому второй основной задачей при разработке САУ является анализ динамических режимов работы САУ. Поведение САУ или любого ее звена в динамических режимах описывается уравнением динамики  $y(t) = F(u, f, t)$ , характеризующим изменение величин во времени. Как правило, это дифференциальное уравнение или система дифференциальных уравнений. Поэтому основным методом исследования САУ в динамических режимах является метод решения дифференциальных уравнений. Порядок

дифференциальных уравнений может быть довольно высоким, то есть зависимостью связаны как сами входные и выходные величины  $u(t)$ ,  $f(t)$ ,  $y(t)$ , так и скорости их изменения, ускорения и т.д. Поэтому уравнение динамики в общем виде можно записать так:

$F(y, y', y'', \dots, y^{(n)}, u, u', u'', \dots, u^{(m)}, f, f', f'', \dots, f^{(k)}) = 0$ , где:  $y', y'', \dots, y^{(n)}, u, u', u'', \dots, u^{(m)}, f, f', f'', \dots, f^{(k)}$  – соответственно: ' – первые; '' – вторые;  $n, m, k$  – производные величин.

### 3.2.2 Передаточная функция

В ТАУ часто используют операторную форму записи дифференциальных уравнений. При этом вводится понятие дифференциального оператора  $p = d/dt$  так, что  $dy/dt = py$ , а  $p^n = d^n/dt^n$ . Это лишь другое обозначение операции дифференцирования. Обратная дифференцированию операция интегрирования записывается как  $1/p$ . В операторной форме исходное дифференциальное уравнение записывается как алгебраическое:

$$a_0 p^{(n)} y + a_1 p^{(n-1)} y + \dots + a_n y = (a_0 p^{(n)} + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n) y = (b_0 p^{(m)} + b_1 p^{(m-1)} + \dots + b_m) u$$

Некоторые правила операционного исчисления математики применимы к операторной форме записи уравнения динамики. Так, оператор  $p$  можно рассматривать в качестве сомножителя без права перестановки, то есть  $py \neq yp$ . Его можно выносить за скобки и т.п. Поэтому уравнение динамики можно записать также в виде:

$$y = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n} u = \frac{K(p)}{D(p)} u = W(p) u$$

Дифференциальный оператор  $W(p)$  называют *передаточной функцией*. В теории управления передаточная функция непрерывной системы представляет собой отношение преобразования Лапласа выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала при нулевых начальных условиях. Знаменатель и числитель передаточной функции — это характеристические полиномы дифференциального уравнения движения линейной системы. Передаточная функция определяет отношение выходной величины звена к входной в каждый момент времени:  $W(p) = y(t)/u(t)$ , поэтому ее еще называют *динамическим коэффициентом усиления*. В установившемся режиме  $d/dt = 0$ , то есть  $p = 0$ , поэтому передаточная функция превращается в коэффициент передачи звена

$$K = b_m/a_n.$$

Знаменатель передаточной функции  $D(p) = (a_0 p^{(n)} + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n)$  называют *характеристическим уравнением*. Его корни, то есть значения  $p$ , при которых знаменатель  $D(p)$  обращается в ноль, а  $W(p)$  стремится к бесконечности, называются полюсами передаточной функции.

Числитель  $K(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m$  называют операторным коэффициентом передачи. Его корни, при которых  $K(p) = 0$  и  $W(p) = 0$ , называются нулями передаточной функции. Звено САУ с известной передаточной функцией называется динамическим звеном. Оно изображается прямоугольником, внутри которого записывается выражение передаточной функции. То есть это обычное функциональное звено, функция которого задана математической зависимостью выходной величины от входной в динамическом режиме. Для звена с двумя входами и одним выходом должны быть записаны две передаточные функции по каждому из входов. Передаточная функция является основной характеристикой звена в динамическом режиме, из которой можно получить все остальные характеристики. Она определяется только параметрами системы и не зависит от входных и выходных величин. Например, одним из динамических звеньев является интегратор. Его передаточная функция  $W_{\text{и}}(p) = 1/p$ . Схема САУ, составленная из динамических звеньев, называется структурной.

### 3.2.3 . Элементарные динамические звенья

Динамика большинства функциональных элементов САУ независимо от исполнения может быть описана одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями не более второго порядка. Такие элементы называют элементарными динамическими звеньями. Передаточная функция элементарного звена в общем виде задается отношением двух полиномов не более чем второй степени:

$$W_3(p) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2};$$

Любую сложную передаточную функцию САУ можно представить как произведение передаточных функций элементарных звеньев. Каждому такому звену в реальной САУ, как правило, соответствует какой-то отдельный узел. Зная свойства отдельных звеньев, можно судить о динамике САУ в целом

В теории удобно ограничиться рассмотрением типовых звеньев, передаточные функции которых имеют числитель или знаменатель, равный единице, то есть

$$W(p) = \frac{1}{Tp+1};$$

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\beta Tp + 1};$$

$$W(p) = 1/p;$$

$$W(p) = p;$$

$$W(p) = Tp + 1;$$

$$W(p) = k.$$

Из них могут быть образованы все остальные звенья. Звенья, у которых порядок полинома числителя больше порядка полинома знаменателя, технически нереализуемы.

### 3.3. Структурные схемы в САУ

Обычно структурная схема САУ состоит из отдельных элементов, соединенных последовательно, параллельно или с помощью обратных связей. Каждый элемент имеет один вход, один выход и заданную передаточную функцию. Структурная схема САУ в простейшем случае строится из элементарных динамических звеньев. Но несколько элементарных звеньев могут быть заменены одним звеном со сложной передаточной функцией. Для этого существуют правила эквивалентного преобразования структурных схем. Рассмотрим возможные способы преобразований.

1. *Последовательное соединение* - выходная величина предшествующего звена подается на вход последующего (рис. 3.13). При этом можно записать:

$$y_1 = W_1 y_0,$$

$$y_2 = W_2 y_1,$$

$$\dots;$$

$$y_n = W_n y_{n-1}$$

$$y_n = W_1 W_2 \dots W_n,$$

$$y_0 = W_{\text{экв}} y_0;$$

$$W_{\text{экв}} = \prod_{i=1}^n W_i,$$

где  $n$  – число элементарных звеньев.

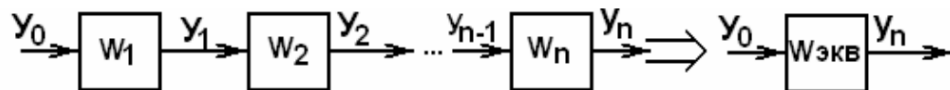


Рис. 3.13 – Последовательное соединение звеньев САУ.

То есть цепочка последовательно соединенных звеньев преобразуется в эквивалентное звено с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев.

Параллельно - согласное соединение (рис.3.14.) - на вход каждого звена подается один и тот же сигнал, а выходные сигналы – складываются. Тогда:

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n = (W_1 + W_2 + \dots + W_n)y_0 = W_{\text{экв}} y_0,$$

$$\text{где } W_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n W_i; \quad n - \text{число элементарных звеньев.}$$

То есть цепочка звеньев, соединенных параллельно - согласно, преобразуется в звено с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций отдельных звеньев.

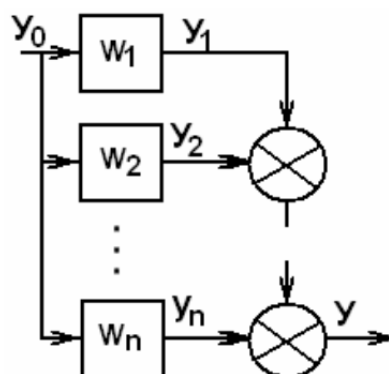


Рис. 3.14 – Параллельно-согласное соединение звеньев САУ.

Параллельно-встречное соединение (рис. 3.15а) – звено охвачено положительной или отрицательной обратной связью. Участок цепи, по которому сигнал идет в противоположном направлении по отношению к системе в целом (то есть с выхода на вход), называется цепью обратной связи с передаточной функцией  $W_{oc}$ . При этом для отрицательной ОС:

$$y = W_n u;$$

$$y1 = W_{oc} y;$$

$$u = y_o - y1,$$

следовательно,

$$y = W_n y_o - W_n y1 = W_n y_o - W_n W_{oc} y$$

$$y(1 + W_n W_{oc}) = W_n y_o; y = W_{экр} y_o,$$

где

$$W_{экр} = \frac{W_n}{1 + W_n W_{oc}}$$

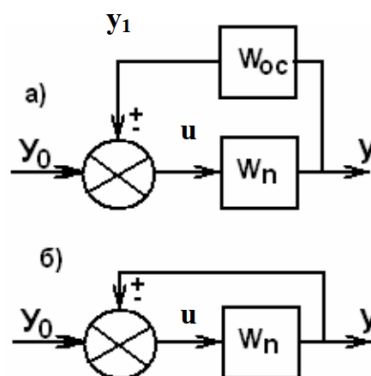


Рис. 3.15 – Параллельно- встречное соединение звеньев.

Аналогично для положительной ОС:

$$W_{экр} = \frac{W_n}{1 - W_n W_{oc}}$$

Если  $W_{oc} = 1$ , то обратная связь называется *единичной* (рис.3.15б), тогда  $W_{экр} = W_n / (1 \pm W_n)$ . Замкнутую систему называют *одноконтурной*, если при ее размыкании в какой-либо точке получают цепочку из последовательно

соединенных элементов (рис.3.16а). Участок цепи, состоящий из последовательно соединенных звеньев, соединяющий точку приложения входного сигнала с точкой съема выходного сигнала, называется *прямой цепью* (рис.3.16б). Передаточная функция прямой цепи –  $W_n = W_o W_1 W_2$ . Цепь из последовательно соединенных звеньев, входящих в замкнутый контур, называют разомкнутой цепью (рис.3.16в), передаточная функция которой  $W_p = W_1 W_2 W_3 W_4$ .

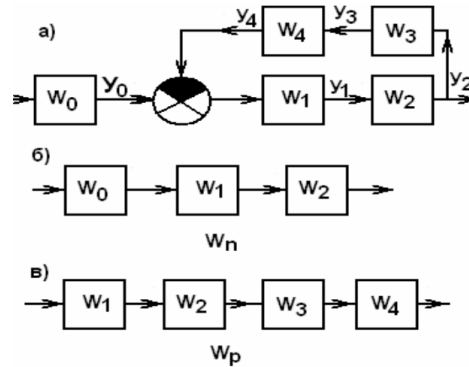


Рис. 3.16 – Замкнутая одноконтурная система.

Исходя из приведенных выше способов эквивалентного преобразования структурных схем, одноконтурная система может быть представлена одним звеном с передаточной функцией:

$$W_{\text{экв}} = \frac{W_n}{1 \pm W_n W_{OC}}$$

– передаточная функция одноконтурной замкнутой системы с отрицательной ОС равна передаточной функции прямой цепи, поделенной на единицу плюс передаточная функция разомкнутой цепи.

Для положительной ОС в знаменателе – знак минус. Если сменить точку снятия выходного сигнала, то меняется вид прямой цепи. Так, если считать выходным сигнал  $y_1$  на выходе звена  $W_1$ , то  $W_p = W_o W_1$ . Выражение для передаточной функции разомкнутой цепи не зависит от точки снятия выходного сигнала. Замкнутые системы бывают *одноконтурными* и *многоконтурными* (рис.3.17). Чтобы найти эквивалентную передаточную функцию для данной схемы, нужно сначала осуществить преобразование отдельных участков.

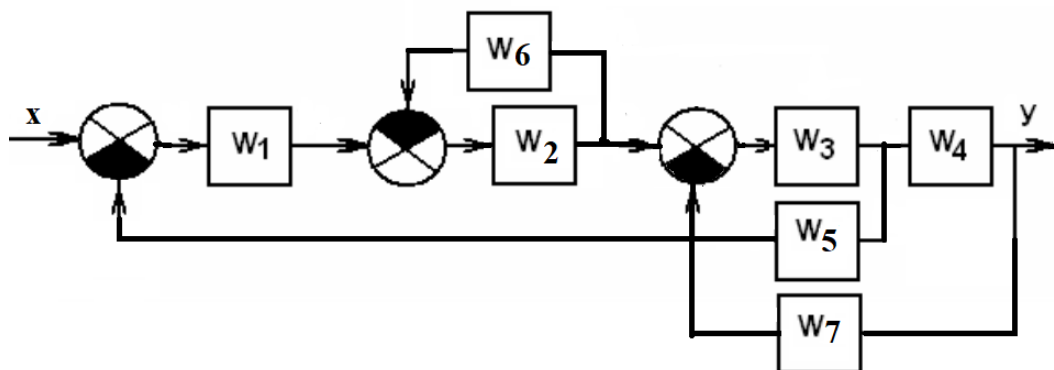


*Рис. 3.17 – Многоконтурные замкнутые системы.*

Если многоконтурная система имеет перекрещивающиеся связи, то для вычисления эквивалентной передаточной функции нужны дополнительные правила. Эти правила сведены в таблицу 3.1.

При этом преобразования необходимо выполнять так, чтобы исходная и преобразованная структурные схемы были эквивалентными, т. е. одинаково отражали динамические свойства исследуемой САР заменяем соединение звеньев  $W_2(p)$  и  $W_6(p)$  эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_8(p) = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p) W_6(p)}$$

Затем последовательное соединение двух звеньев с передаточными функциями  $W_1(p)$  и  $W_8(p)$  заменим эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_9(p) = W_1(p) W_8(p).$$

Чтобы освободиться от перекрещивающейся связи, перенесем узел разветвления через звено с передаточной функцией  $W_4(p)$  против направления передачи сигнала. При этом последовательно со звеном, имеющим передаточную функцию  $W_7(p)$ , нужно включить звено с передаточной функцией  $W_4(p)$ . Получившееся последовательное соединение двух звеньев заменим эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_{10}(p) = W_4(p) W_7(p)$$

Далее соединение с отрицательной обратной связью звеньев с передаточными функциями  $W_3(p)$  и  $W_{10}(p)$  заменим эквивалентным звеном передаточной функцией

$$W_{11}(p) = \frac{W_3(p)}{1 + W_3(p) W_{10}(p)}$$

Последовательное соединение звеньев с передаточными функциями  $W_9(p)$  и  $W_{11}(p)$  заменим эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_{12}(p) = W_9(p) W_{11}(p)$$

Соединение с отрицательной обратной связью звеньев с передаточными функциями  $W_5(p)$  и  $W_{12}(p)$  заменим эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_{13}(p) = \frac{W_{12}(p)}{1 + W_{12}(p) W_5(p)}$$

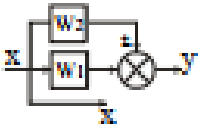
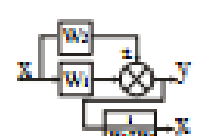
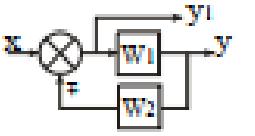
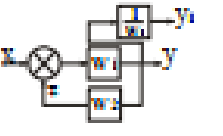
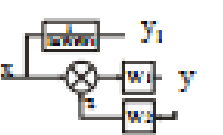
Искомая результирующая передаточная функция САР будет

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = W_4(p) W_{13}(p)$$

### 3.4. Нелинейные системы автоматического управления

Строго говоря, линейных систем в природе не существует, так как характеристики реальных устройств нелинейные и некоторые из них не могут быть линеаризованы, например, характеристика логического элемента. Кроме того, есть системы, например, релейные, адаптивные, в которых принципиально необходимо учитывать нелинейности.

Таблица 3.1 – Правила структурных преобразований

| Преобразование                                       | Структурная схема                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                      | Исходная                                                                                                                                                                   | Эквивалентная                                                                                                                                                                  |
| Перенос точки разветвления через элемент             | <br>     | <br>     |
| Перенос сумматора через элемент                      | <br>   | <br>    |
| Вынос точки разветвления из параллельного соединения | <br> | <br> |
| Вынос точки разветвления из контура обратной связи   | <br> | <br> |

*Нелинейной системой* называется такая система, в состав которой входит хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением. Такое звено называется нелинейным звеном или нелинейным элементом. Уравнение является нелинейным, если некоторые координаты или их производные по времени входят в уравнение в виде произведений или степени, отличной от первой, а также если коэффициенты уравнения являются функциями

некоторых координат или их производных. При составлении дифференциальных уравнений нелинейных систем сначала составляют дифференциальные уравнения для каждого устройства системы. При этом характеристики устройств, допускающих линеаризацию, линеаризуются. В результате получают систему дифференциальных уравнений, в которой одно или несколько уравнений нелинейные. Устройства, допускающие линеаризацию, образуют линейную часть системы, а устройства, которые не могут быть линеаризованы, составляют нелинейную часть.

Путем эквивалентного преобразования структурных схем и нелинейных звеньев большое число нелинейных систем можно представить в виде замкнутого контура с последовательным включением нелинейного элемента (НЭ) и линейной части (ЛЧ), как показано на рис. 3.18.

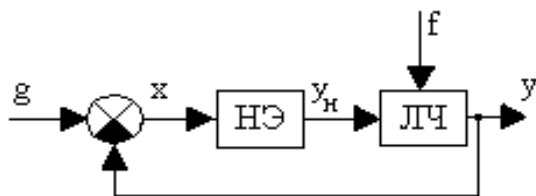


Рис. 3.18. Функциональная схема нелинейной системы: НЭ - нелинейный элемент; ЛЧ - линейная часть

*Классификация нелинейных элементов и систем.* Нелинейные звенья классифицируются по различным признакам. Наибольшее распространение получила классификация по статическим и динамическим характеристикам, так как в системах чаще всего нелинейности приходится учитывать в виде характеристик. Эти характеристики могут быть как однозначными, так и двузначными (петлевыми), симметричными и несимметричными относительно начала координат.

Различают следующие основные типы нелинейных звеньев.

*Нелинейные звенья с гладкими криволинейными характеристиками.* Примеры таких характеристик приведены на рис. 3.19.

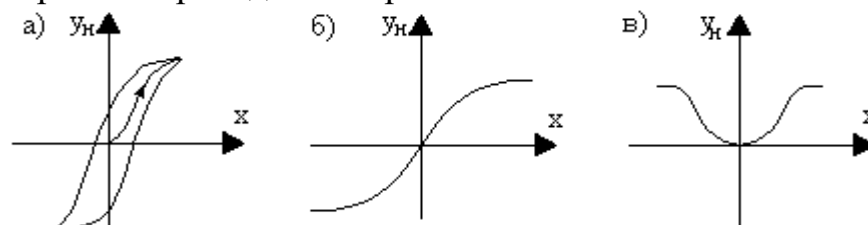


Рис. 3.19. Гладкие криволинейные характеристики:  
а - гистерезисная; б, в - усилительные

На рис. 3.19а изображена двузначная гистерезисная (запаздывающая) характеристика. Характеристика (рис. 3.19б) отображает насыщение или ограничение и соответствует реальному амплитудному усилителю, а характеристика (рис. 3.19в) - реальному усилителю мощности.

Характеристики (рис. 3.19а и б) – нечетно-симметричные, а характеристика (рис. 3.19в) – четно-симметричная.

*Нелинейные звенья с кусочно-линейными характеристиками.* Некоторые из таких характеристик представлены на рис. 3.20.

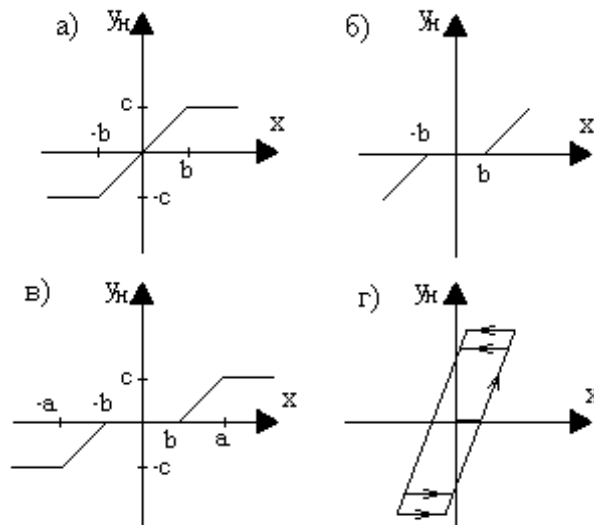


Рис. 3.20. Кусочно-линейные характеристики:

*а - с насыщением; б - с зоной нечувствительности; в - с насыщением и зоной нечувствительности; г - люфт*

Характеристика (рис. 3.20а) отображает насыщение, характеристика (рис. 3.20б) – зону нечувствительности, а характеристика (рис. 3.20в) соответствует звену, обладающему одновременно зоной нечувствительности и насыщением. Характеристика (рис. 3.20г) позволяет учесть люфт или зазор кинематической передачи.

*Релейные звенья* – это элементы, которые на своем выходе выдают конечное число фиксированных значений. Три наиболее типовые релейные характеристики изображены на рис. 3.21.

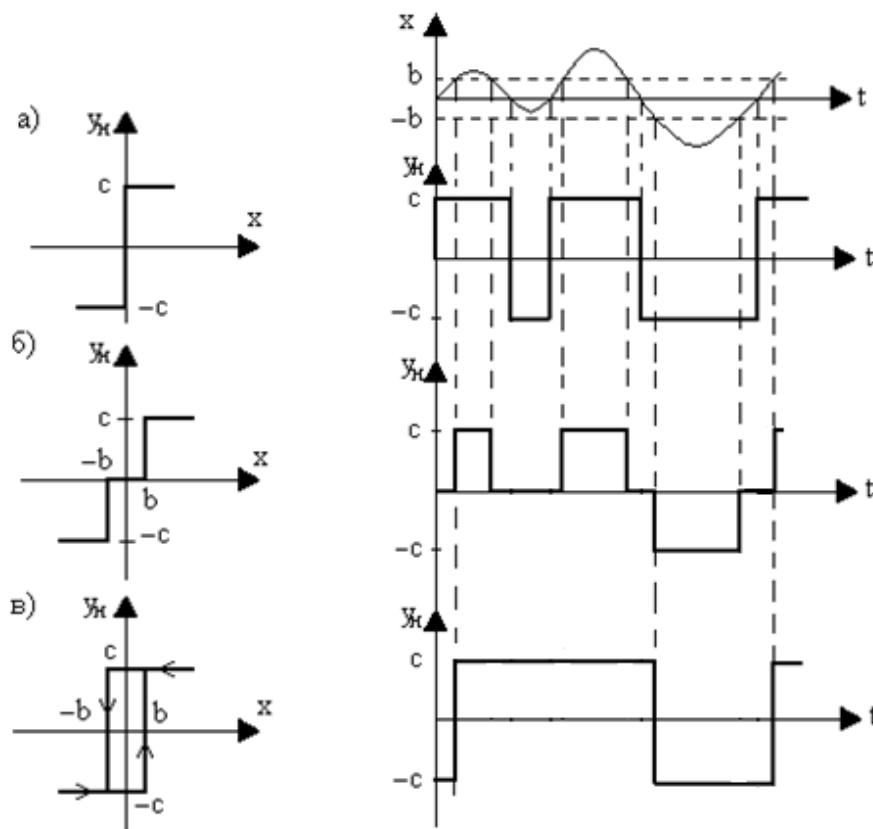


Рис. 3.21. Релейные характеристики:

*а - идеальная; б - с зоной нечувствительности; в - гистерезисная*

Характеристика (рис. 3.21а) соответствует идеальному двухпозиционному реле, характеристика (рис. 3.21б) – трехпозиционному реле с зоной нечувствительности, а характеристика (рис. 3.21в) – двухпозиционному поляризованному реле.

Кроме того, на рис. 3.21 показано прохождение непрерывного сигнала через соответствующие типы реле. Откуда следует, что коэффициент передачи реле зависит от величины входного воздействия.

Для улучшения динамических свойств систем специально созданы нелинейные звенья с опережающими двузначными статическими характеристиками.

Часто встречаются элементы с несимметричными относительно начала координат статическими характеристиками.

*Нелинейные вычислительные звенья*, например, множительное, логическое звено и другие.

Различают *статические* и *динамические* нелинейности. Первые представляются в виде нелинейных статических характеристик, а вторые - в виде нелинейных дифференциальных уравнений.

Нелинейные системы обычно классифицируются в соответствии с видом входящих в них нелинейных звеньев.

*Особенности нелинейных систем.* Поведение нелинейных систем, при наличии существенных нелинейностей, значительно отличается от поведения их линейных моделей.

1. Выходная величина нелинейной системы непропорциональна входному воздействию, форма реакции системы зависит от величины входного воздействия.

2. Характер процессов в нелинейной системе зависит от величины начального отклонения, вызванного возмущением. В связи с этим для нелинейных систем существуют понятия об устойчивости “в малом”, “в большом”, “в целом”.

Система устойчива “в малом”, если она устойчива при малых (бесконечно малых) начальных отклонениях. Система устойчива “в большом”, если она устойчива при больших (конечных по величине) начальных отклонениях. Система устойчива “в целом”, если она устойчива при любых больших (неограниченных по величине) начальных отклонениях.

3. Для нелинейных систем характерен режим незатухающих периодических колебаний с постоянной амплитудой и частотой (автоколебаний), возникающий в системах при отсутствии периодических внешних воздействий.

4. При затухающих колебаниях переходного процесса в нелинейных системах происходит изменение периода колебаний.

*Основные задачи исследования нелинейных систем. Методы исследования.* Задачами исследования нелинейных систем являются:

1) отыскание возможных состояний равновесия системы и исследование их устойчивости;

2) определение автоколебаний и анализ их устойчивости;

3) исследование процессов перехода системы к тому или иному установившемуся состоянию при различных начальных отклонениях.

Начало исследования нелинейных систем обычно связано с рассмотрением устойчивости и определением автоколебаний.

В настоящее время не создано общей теории анализа нелинейных систем. Разработанные методы позволяют решать лишь отдельные нелинейные задачи.

Все инженерные методы исследования нелинейных систем разделяются на две основные группы.

*Точные методы*, например, метод А.М.Ляпунова, метод фазовой плоскости, метод точечных преобразований, частотный метод В.М.Попова, основаны на точном решении нелинейного дифференциального уравнения, может быть и упрощенного.

*Приближенные методы*, такие как метод гармонической линеаризации, метод статистической линеаризации, основаны на линеаризации нелинейного уравнения системы.

Мощным и эффективным методом исследования нелинейных систем является моделирование, инструментарием которого служит компьютер. В настоящее время многие сложные для аналитического решения теоретические и практические вопросы сравнительно легко могут быть решены с помощью вычислительной техники.

### **Контрольные вопросы к главе 3.**

1. Что называется статическим режимом САУ?
2. Что называется статическими характеристиками САУ?
3. В каком случае статическая характеристика задается семейством кривых?
4. Что называется уравнением статики САУ?
5. Что называется коэффициентом передачи, в чем его отличие от коэффициента усиления?
6. В чем отличие нелинейных звеньев от линейных?
7. Как построить статическую характеристику нескольких звеньев?
8. В чем отличие астатических звеньев от статических?
9. В чем отличие астатического регулирования от статического?
10. Как сделать статическую САУ астатической?
11. Что называется статической ошибкой регулятора, как ее уменьшить?
12. Что называется статизмом САУ?
13. Назовите достоинства и недостатки статического и астатического регулирования?
14. Какой режим САУ называется динамическим?
15. Что называется регулированием?
16. Назовите возможные виды переходных процессов в САУ.
17. Что называется уравнением динамики?
18. Как провести теоретическое исследование динамики САУ?
19. Почему уравнение динамики САУ называется уравнением в отклонениях?
20. Справедлив ли для уравнения динамики САУ принцип суперпозиции?
21. Представьте звено с двумя и более входами схемой, состоящей из звеньев с одним входом?
22. Запишите линеаризованное уравнение динамики в обычной форме.
23. Какими свойствами обладает дифференциальный оператор  $p$ ?
24. Что называется передаточной функцией звена?
25. Запишите линеаризованное уравнение динамики с использованием передаточной функции.
27. Что называется динамическим коэффициентом усиления звена?
28. Что называется характеристическим полиномом звена?
29. Что называется нулями и полюсами передаточной функции?
30. Что называется динамическим звеном?

31. Что называется структурной схемой САУ?
32. Что называется элементарными и типовыми динамическими звеньями?
33. Как сложную передаточную функцию разложить на передаточные функции типовых звеньев?
34. Запишите линеаризованное уравнение динамики в операторной форме.
35. Перечислите типичные схемы соединения звеньев САУ?
36. Как преобразовать цепь последовательно соединенных звеньев к одному звену?
37. Как преобразовать цепь параллельно соединенных звеньев к одному звену? Как преобразовать обратную связь к одному звену?
38. Что называется прямой цепью САУ?
39. Что называется разомкнутой цепью САУ?
40. Как перенести сумматор через звено по ходу и против движения сигнала?
41. Как перенести узел через звено по ходу и против движения сигнала?
42. Как перенести узел по ходу и против движения сигнала?
43. Как перенести сумматор через сумматор по ходу и против движения сигнала?
44. Как перенести узел через сумматор и сумматор через узел по ходу и против движения сигнала?
45. Что называется неэквивалентными участками линий связи в структурных схемах?
46. Как преобразовать обратную связь к одному звену?
47. Что собой представляет функциональная схема нелинейной системы?
48. Приведите характеристики нелинейных звеньев
49. Что собой представляют релейные звенья?
50. Какие особенности нелинейных систем?
51. Какие задачи исследования нелинейных систем?
52. Какие существуют методы исследования нелинейных систем?

## **Глава 4.    Временные характеристики САУ**

### **4.1.    Понятие временных характеристик**

Для оценки динамических свойств системы и отдельных звеньев принято исследовать их реакцию на типовые входные воздействия, которые наиболее полно отражают особенности реальных возмущений. Это позволяет сравнивать отдельные элементы между собой с точки зрения их динамических свойств и, зная реакцию системы на типовые воздействия, можно судить о том, как она будет вести себя при сложных изменениях входной величины. Наиболее распространенными типовыми воздействиями являются: ступенчатое, импульсное и гармоническое воздействия. Любой сигнал  $u(t)$ , имеющий сложную форму, можно разложить на сумму типовых воздействий

$u_i(t)$  и исследовать реакцию системы на каждую из составляющих, а затем, пользуясь принципом суперпозиции, получить результирующее изменение выходной величины  $y(t)$ , суммируя полученные таким образом составляющие выходного сигнала  $y_i(t)$ . Особенно важное значение в ТАУ придают ступенчатому воздействию

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases}$$

Все остальные воздействия могут быть сведены к нему. Так, например, реальный импульсный сигнал может быть представлен двумя ступенчатыми сигналами одинаковой величины, но противоположными по знаку, поданными один за другим через интервал времени  $t$  (рис.4.1.).

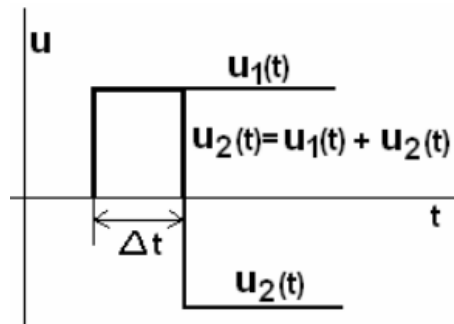


Рис. 4.1 – Представление импульсного сигнала двумя ступенчатыми.

Зависимость изменения выходной величины системы от времени при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия при нулевых начальных условиях называется *переходной характеристикой* и обозначается  $h(t)$ . Не менее важное значение в ТАУ уделяется *импульсной переходной характеристике*  $\omega(t)$ , которая описывает реакцию системы на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях. Единичный импульс физически представляет из себя, ограничивающий единичную площадь, очень узкий импульс, ширина которого стремится к нулю, а высота - к бесконечности. Математически он описывается дельта - функцией  $d(t) = u'(t)$ .

Переходная и импульсная переходная характеристики называются *временными характеристиками*. Каждая из них является исчерпывающей характеристикой системы и любого ее звена при нулевых начальных условиях. По ним можно однозначно определить выходную величину при произвольном входном воздействии. Зная передаточную функцию  $W(p) = K(p)/D(p)$ , выражение для переходной функции можно найти из формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{K(p_k) e^{p_k t}}{p_k D'(p_k)},$$

где  $p_k$  - корни характеристического уравнения  $D(p) = 0$ .

Взяв производную от переходной функции, можно получить выражение для импульсной переходной функции  $\omega(t) = h'(t)$ .

#### 4.2. Переходные характеристики элементарных звеньев

Типовым динамическим звеном (ТДЗ) САР является составная часть системы, которая описывается дифференциальным уравнением не выше второго порядка. Звено, как правило, имеет один вход и один выход. Рассмотрим основные типовые звенья.

##### 4.2.1 Безынерционное (пропорциональное, усилительное) звено

Типовое уравнение взаимосвязи выходного и входного сигналов этого звена является алгебраическим:

$$y(t) = ku(t); y(p) = k \cdot u(p)$$

где  $k$  - постоянный коэффициент.

Передаточная функция:

$$W(p) = k \quad W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = k$$

Переходная характеристика:

$$h(t) = k1(t).$$

Пропорциональное звено мгновенно (без инерции) реагирует на возмущающее воздействие. Выходной сигнал пропорционален входному сигналу. Ордината выходного сигнала равна коэффициенту пропорциональности  $k$ . В ответ на единичное ступенчатое воздействие сигнал на выходе мгновенно достигает величины в  $k$  раз большей, чем на входе, и сохраняет это значение (рис.4.2а.). При  $k = 1$  звено никак себя не проявляет, а при  $k = -1$  - инвертирует входной сигнал. Любое реальное звено обладает инерционностью, но с определенной точностью некоторые реальные звенья могут рассматриваться как безынерционные, например, жесткий механический рычаг (рис.4.2б), редуктор (рис.4.2в), потенциометр (рис.4.2г) и т.п.

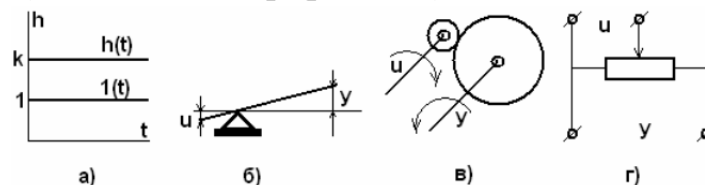


Рис. 4.2 – Примеры безынерционного (пропорционального, усилительного) звена.

##### 4.2.2 Интегрирующее (астатическое) звено

Уравнение интегрирующего звена имеет следующий вид:

$$y(t) = k \int_0^t u(t) dt ,$$

Или

$$\frac{dy}{dt} = ku$$

или  $py(p) = ku(p)$ .

Передаточная функция:  $W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = k/p$

Переходная характеристика (рис.4.3.):

$$h(t) = k \int_0^t 1(t) dt = kt$$

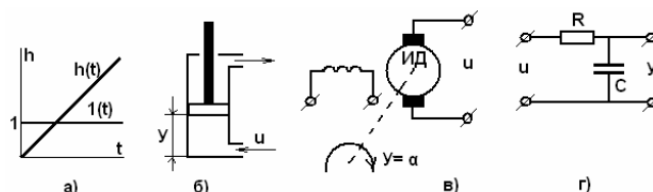


Рис. 4.3 – Примеры интегрирующих (астатических) звеньев.

При  $k = 1$  звено представляет собой “чистый” интегратор  $W(p) = 1/p$ . Интегрирующее звено неограниченно “накапливает” входное воздействие. Введение его в САУ превращает систему в астатическую (рис. 4.3а), то есть ликвидирует статическую ошибку. Примерами интегрирующих звеньев могут быть поршневой гидравлический двигатель (рис. 4.3б), электродвигатель (рис.4.3в), электрическая емкость (рис. 4.3г) и т.п.

Примером реализации астатического ТДЗ может быть любой накопитель - бак с жидкостью, на выходе которого работает насос с постоянной производительностью (рис. 4.4).

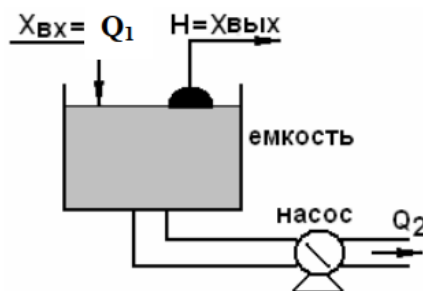


Рис. 4.4 – Пример реализации астатического звена – бак с жидкостью и выходным насосом.

Объекты, которые аппроксимируют астатическим или интегрирующим звеном, называют *астатическими объектами*.

#### 4.2.3 Инерционное звено первого порядка (апериодическое)

Уравнение динамики инерционного звена первого порядка:

$$T \frac{dy}{dt} + y = ku$$

или

$$Tpy + y = ku$$

Это уравнение динамики, называемое иногда кривой разгона, имеет вид экспоненты.

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

Переходная характеристика может быть получена с помощью формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \frac{K(p_1)e^{p_1 t}}{p_1 D'(p_1)} = \frac{k}{T0 + 1} + \frac{ke^{-t/T}}{-(1/T)T} = k(1 - e^{-t/T})$$

где  $p_1 = -1/T$  - корень уравнения  $D(p) = Tp + 1 = 0$ ;  $D'(p_1) = T$ .

Переходная характеристика имеет вид экспоненты (рис.4.5а), по которой можно определить передаточный коэффициент  $k$ , равный установившемуся значению  $h$  (асимптота), и постоянную времени  $T_0$  по времени  $t$ , соответствующему точке пересечения касательной к кривой в начале координат с ее асимптотой. При достаточно больших  $T_0$  звено на начальном участке может рассматриваться как интегрирующее, при малых  $T$  звено приближенно можно рассматривать как безынерционное. Пример апериодического звена - четырехполюсник из сопротивления  $R$  и емкости  $C$  (рис.4.5б).

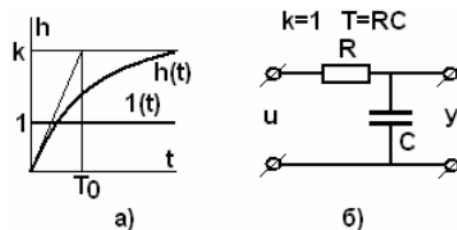


Рис. 4.5 – Инерционное звено первого порядка (апериодическое).

У экспоненты есть свойство: если к любой ее точке провести касательную, а затем точку касания и точку пересечения касательной с асимптотой, к которой с течением времени приближается экспонента, спроецировать на ось времени  $t$ , то получают одну и ту же величину времени - «постоянную времени»  $T_0$ , которая характеризует инерционные свойства объекта. Ордината асимптоты, к которой стремится экспонента, по величине равна коэффициенту  $k$  в передаточной функции апериодического звена. Таким образом, по графику кривой разгона можно найти оба коэффициента-  $k$  и  $T_0$  в передаточной функции апериодического звена. Еще одним примером реализации апериодического звена может быть установка - емкость равного по высоте сечения, которая изображена на рис. 4.6. Бак на входе заполняет поток воды с расходом  $Q_1$ , из бака вытекает свободно поток с расходом  $Q_2$ .

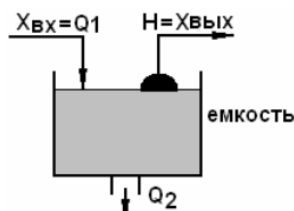


Рис. 4.6 – Пример реализации апериодического звена при наполнении и истечении емкости с равным расходом.

Регулируемый параметр  $X_{вых}$  - уровень  $H$  в баке. При «единичном скачке»  $Q_1$  уровень  $H$  повышается, увеличивается гидростатическое давление, возрастает  $Q_2$  и затем уровень  $H$  стабилизируется (экспонента приближается к асимптоте). Эта способность самостоятельно восстанавливать равновесие, присущая объектам, аппроксимируемым апериодическим ТДЗ (типовое динамическое звено) за счет наполнения или опорожнения энергии или вещества, называется *самовыравниванием*.

Самовыравнивание количественно определяется *коэффициентом самовыравнивания*, который равен обратной величине коэффициента  $k$  передаточной функции звена:

$$C = 1/k.$$

#### 4.2.4 Инерционные звенья второго порядка

Уравнение инерционного звена второго порядка:

$$T_1^2 p^2 y + T_2 p y + y = k u.$$

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$$

Решение уравнения зависит от соотношения постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ , которое определяет коэффициент затухания

$$r = \frac{T_2}{2T_1}$$

Можно записать

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2rTp + 1},$$

где  $T = T_1$ .

Если  $r \geq 1$ , то знаменатель  $W(p)$  имеет два вещественных корня  $p_1$  и  $p_2$  и раскладывается на два сомножителя:

$$T^2 p^2 + 2rTp + 1 = T^2 (p - p_1)(p - p_2).$$

Такое звено можно разложить на два апериодических звена первого порядка, поэтому оно не является элементарным.

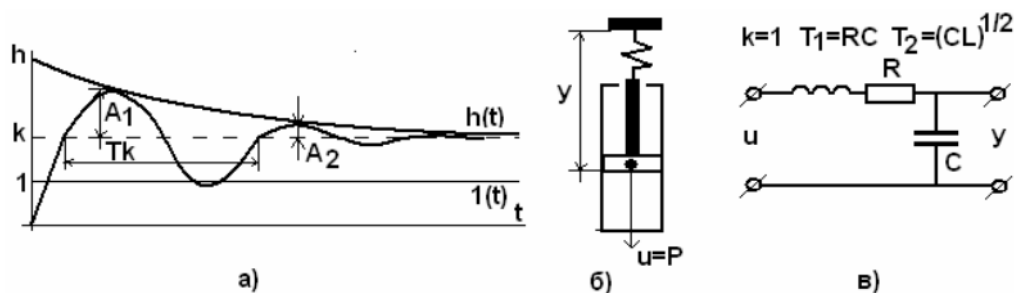


Рис. 4.7 – Переходная характеристика инерционного звена второго порядка:  $A_1$ ;  $A_2$  – амплитуда колебаний в разное время  $t$ ;  $T_k$  – период колебаний;  $1(t)$  – единичная функция;  $h(t)$  – переходная характеристика.

При  $r < 1$  корни полинома знаменателя  $W(p)$  комплексно сопряженные:  $p_{1,2} = \alpha \pm j\omega$ .

Переходная характеристика представляет собой выражение, характеризующее затухающий колебательный процесс (рис.4.7а), с затуханием  $\alpha$  и частотой  $\omega$  (рис.4.7). Такое звено называется *колебательным*.

При  $r = 0$  колебания носят незатухающий характер. Такое звено является частным случаем колебательного звена и называется *консервативным*.

Примерами колебательного звена могут служить пружина, имеющая успокоительное устройство (рис.4.7б), электрический колебательный контур с активным сопротивлением (рис.4.7в) и т.п. Зная характеристики реального устройства можно, определить его параметры как колебательного звена. Передаточный коэффициент  $k$  равен установившемуся значению переходной функции.

#### 4.2.5 Дифференцирующее звено

Различают идеальное и реальное дифференцирующие звенья.

Уравнение динамики идеального звена:

$$y(t) = k \frac{du}{dt}$$

, или  $y(p) = k \cdot p \cdot u(p)$

Здесь выходная величина пропорциональна скорости изменения входной величины. Передаточная функция:

$$W(p) = kp.$$

При  $k=1$  звено осуществляет чистое дифференцирование

$W(p) = p$ . Переходная характеристика:

$$h(t) = k \cdot 1'(t) = k \cdot \delta(t).$$

Идеальное дифференцирующее звено реализовать невозможно, так как величина всплеска выходной величины при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия всегда ограничена. На практике используют

реальные дифференцирующие звенья, осуществляющие приближенное дифференцирование входного сигнала.

Его уравнение:

$$T \cdot p \cdot y(p) + y(p) = k \cdot T \cdot p \cdot u(p)$$

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{kTp}{1+Tp};$$

При малых  $T$  звено можно рассматривать как идеальное дифференцирующее.

Переходную характеристику можно вывести с помощью формулы Хевисайда:

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \frac{K(p_1)e^{p_1 t}}{p_1 D'(p_1)} = ke^{-t/T},$$

здесь  $p_1 = -1/T$  - корень характеристического уравнения  $D(p) = Tp + 1 = 0$ ; кроме того,  $D'(p_1) = T$ .

По переходной характеристике, имеющей вид экспоненты (рис.4.8а), можно определить передаточный коэффициент  $k$  и постоянную времени  $T$ . Примерами таких звеньев могут являться четырехполюсник из сопротивления и емкости (рис.4.8б) и демпфер, (рис.4.8в). Дифференцирующие звенья являются главным средством, применяемым для улучшения динамических свойств САУ.

При подаче на вход единичного ступенчатого воздействия выход оказывается ограничен по величине и растянут во времени (рис.4.8а).

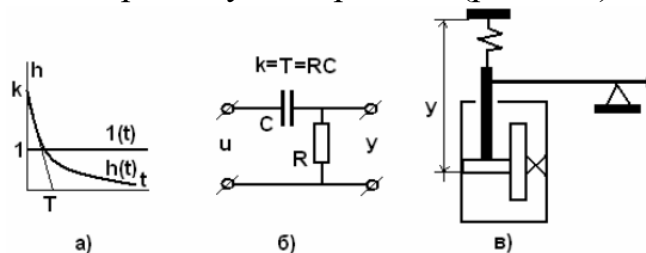


Рис. 4.8 – Разновидность типовых дифференцирующих звеньев САУ.

### 1.1.1 Запаздывающее (чистого или транспортного запаздывания) звено

Запаздывающее звено имеет переходную характеристику

$$W(p) = e^{-pT},$$

и воспроизводит входное воздействие с запаздыванием по времени  $T$ .

Примером реализации запаздывающего звена может быть ленточный транспортёр длиной  $L$ , перемещающийся со скоростью  $V$  (рис. 4.9). Поток сыпучего материала в начале ленточного транспортёра  $Q_1 = X_{вх}$ , поток материала, ссыпавшегося в конце -  $Q_2 = X_{вых}$ . Время движения материала по ленточному транспортёру будет равно:

$$\Delta\tau = L/V = \tau_o.$$

Если на вход ленточного транспортёра подать возмущение типа «единичного скачка» (открыть подачу материала), то этот же «единичный скачок» появится на выходе транспортёра через отрезок времени равный времени запаздывания. Кривая разгона такого процесса изображена на рис. 4.10. Теперь представим, что на вход транспортёра подан «единичный импульс»- единица материала. Через время запаздывания мы его получим на выходе - в конце ленточного транспортёра.

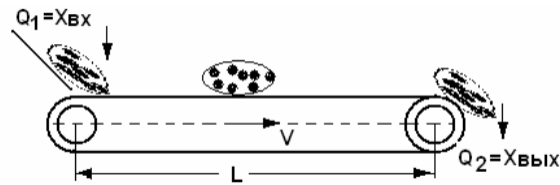


Рис. 4.9 – Пример реализации запаздывающего звена – перемещение продукта по транспортеру.

Следовательно, выходной сигнал запаздывающего звена повторяет входной сигнал, но позже на время запаздывания. Исходя из этого, можно записать общее уравнение взаимосвязи входного и выходного сигналов запаздывающего звена в динамическом режиме работы:  $X_{вых}(T) = X_{вх}(T + T_0)$ . Реальные объекты управления могут состоять из нескольких типовых звеньев ТДЗ (типовое динамическое звено), которые соединяются последовательно, параллельно и смешанно.

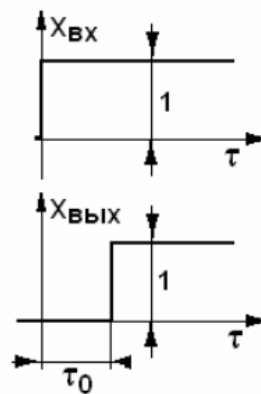


Рис. 4.10 – Переходная характеристика запаздывающего звена.

Контрольные вопросы к главе 4.

1. Что называется и какие вы знаете типовые входные воздействия? Для чего они нужны?
2. Что называется переходной характеристикой?
3. Что называется импульсной переходной характеристикой?
4. Дайте определение временной характеристики?
5. Как получить кривую переходного процесса при сложной форме входного воздействия, если известна переходная характеристика звена?
6. Что называется безынерционным звеном?
7. Напишите уравнение динамики безынерционного звена.

8. Напишите передаточную функцию безынерционного звена.
9. Нарисуйте вид переходной характеристики безынерционного звена.
10. Что называется интегрирующим звеном?
11. Напишите уравнение динамики интегрирующего звена.
12. Напишите передаточную функцию интегрирующего звена.
13. Назовите вид переходной характеристики интегрирующего звена.
14. Что называется аperiodическим звеном?
15. Напишите уравнение динамики аperiodического звена.
16. Напишите передаточную функцию аperiodического звена.
17. Нарисуйте вид переходной характеристики аperiodического звена.
18. Что называется колебательным звеном?
19. Напишите уравнение динамики колебательного звена.
20. Напишите передаточную функцию колебательного звена.
21. Нарисуйте вид переходной характеристики колебательного звена.
22. Почему не являются элементарными инерционные звенья второго порядка с коэффициентом затухания большим или равным единице?
23. Что называется реальным дифференцирующим звеном, его уравнение динамики, передаточная функция, вид переходной характеристики?
24. Что называется дифференцирующим звеном?
25. Напишите уравнение динамики дифференцирующего звена.
26. Напишите передаточную функцию дифференцирующего звена.
27. Нарисуйте вид переходной характеристики дифференцирующего звена.

## Глава 5. Частотные характеристики САУ

### 5.1. Понятие частотных характеристик

В условиях реальной эксплуатации САУ часто возникает необходимость определить реакцию на периодические сигналы, т.е. определить сигнал на выходе САУ, если на один из входов подается периодически сигнал гармонической формы. Решение этой задачи возможно получить путем использования частотных характеристик системы. Зависимости, связывающие амплитуду и фазу выходного сигнала с частотой входного сигнала, называются частотными *характеристиками (ЧХ)*. Анализ ЧХ системы с целью исследования ее динамических свойств называется *частотным анализом*.

Частотные характеристики могут быть получены экспериментальным или аналитическим путем. При аналитическом определении исходным моментом является одна из передаточных функций САУ (по управлению или по возмущению).

Возможно также определение частотных характеристик исходя из передаточных функций разомкнутой системы и передаточной функции по

ошибке. Если подать на вход системы с передаточной функцией  $W(p)$  гармонический сигнал

$$u(t) = U_m \cdot (\cos \omega t + j \sin \omega t),$$

где  $U_m$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – частота колебаний,  $t$  – время, то после завершения переходного процесса на выходе установятся гармонические колебания

$$y(t) = Y_m e^{j(\omega t + \varphi)} = Y_m \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\varphi}$$

с той же частотой  $\omega$ , но иными амплитудой  $Y_m$  и фазой  $\varphi$ , зависящими от частоты  $\omega$  возмущающего воздействия. По ним можно судить о динамических свойствах системы.

Подставим выражения для  $u(t)$  и  $y(t)$  в уравнение динамики  $(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n) y(p) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) u(p)$ .

Учтем, что

$$p u = p U_m e^{j\omega t} = U_m j\omega e^{j\omega t} = j\omega u,$$

$$\text{а значит } p^n u = p^n U_m e^{j\omega t} = U_m (j\omega)^n e^{j\omega t} = (j\omega)^n u.$$

Аналогичные соотношения можно записать и для левой части уравнения. Получим:

$$p^n u = p^n U_m e^{j\omega t} = (j\omega)^n U_m e^{j\omega t} = (j\omega)^n u$$

По аналогии с передаточной функцией можно записать:

$$y = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_n} u = W(j\omega) u$$

$W(j\omega)$ , равная отношению выходного сигнала к входному при изменении входного сигнала по гармоническому закону, называется *частотной передаточной функцией*. Легко заметить, что она может быть получена путем простой замены  $p$  на  $j\omega$  в выражении  $W(p)$ .

$W(j\omega)$  есть комплексная функция, поэтому:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega);$$

где  $P(\omega)$  - вещественная ЧХ (ВЧХ);

$Q(\omega)$  - мнимая часть ЧХ (МЧХ);

$A(\omega)$  - амплитудная ЧХ (АЧХ);

$\varphi(\omega)$  - фазовая ЧХ (ФЧХ).

АЧХ — зависимость амплитуды установившихся колебаний выходного сигнала некоторой системы от частоты её входного гармонического сигнала;

ФЧХ - сдвиг по фазе выходной величины относительно входной:

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}$$

Если  $W(j\omega)$  изобразить вектором на комплексной плоскости, то при изменении

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$$

и  $\omega$  от 0 до  $+\infty$  его конец будет вычерчивать кривую, называемую *годографом вектора  $W(j\omega)$* , или *амплитудно - фазовую частотную характеристику*

(АФЧХ) (рис.5.1.). Ветвь АФЧХ при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $0$  можно получить зеркальным отображением данной кривой относительно вещественной оси.

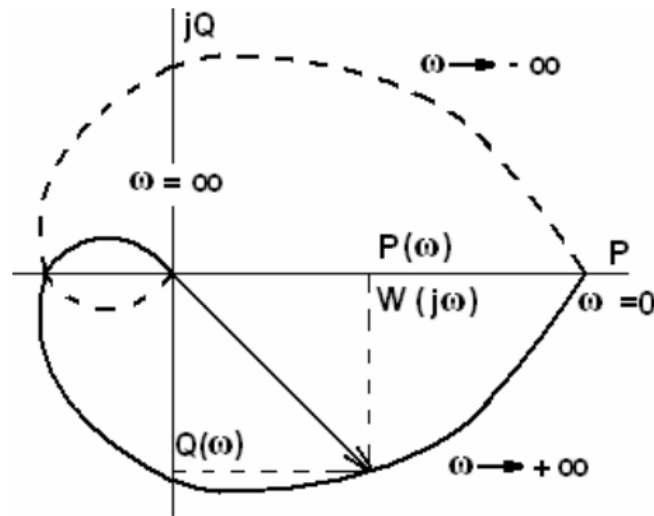


Рисунок 5.1 – Годограф вектора  $W(j\omega)$  (АФЧХ).

В ТАУ широко используются логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) (рис.5.2.): логарифмическая амплитудная ЧХ (ЛАЧХ)  $L(\omega)$  и логарифмическая фазовая ЧХ (ЛФЧХ)  $\varphi(\omega)$ . Они получаются путем логарифмирования передаточной функции. По оси абсцисс откладывается частота  $\omega$  в логарифмическом масштабе. То есть единичным промежуткам по оси абсцисс соответствует изменение  $\omega$  в 10 раз. Такой интервал называется *декадой*. Так как  $\lg(0) = -\infty$ , то ось ординат проводят произвольно.

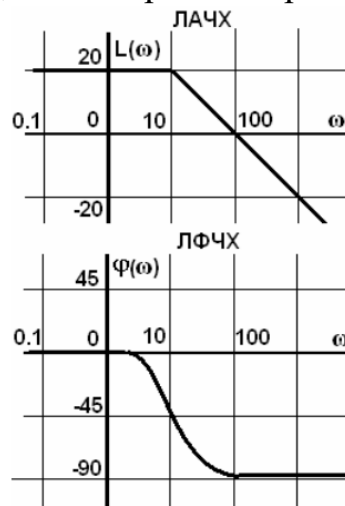


Рис. 5.2 – Логарифмические частотные характеристики.

## 5.2. Частотные характеристики типовых звеньев

Зная передаточную функцию звена  $W(p)$  легко получить все его частотные характеристики. Для этого необходимо подставить в нее  $j\omega$  вместо  $p$ , получим АФЧХ  $W(j\omega)$ . Затем надо выразить из нее ВЧХ  $P(\omega)$  и МЧХ  $Q(\omega)$ . После этого

преобразуют АФЧХ в показательную форму и получают АЧХ  $A(\omega)$  и ФЧХ  $\varphi(\omega)$ , а затем определяют выражение ЛАЧХ  $L(\omega) = 20\lg A(\omega)$  (ЛАЧХ отличается от ФЧХ только масштабом оси абсцисс).

### 5.2.1 Безынерционное звено

Передаточная функция:

$$W(p) = k.$$

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = k.$$

$$\text{ВЧХ: } P(\omega) = k.$$

$$\text{МЧХ: } Q(\omega) = 0.$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = k.$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = 0.$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20\lg k.$$

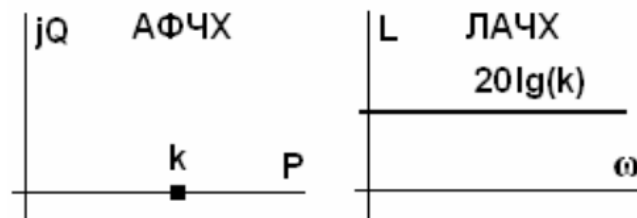


Рис. 5.3 – АФЧХ и ЛАЧХ безынерционного звена.

Некоторые ЧХ показаны на рис.5.3. Звено пропускает все частоты одинаково с увеличением амплитуды в  $k$  раз и без сдвига по фазе.

### 5.2.2 Интегрирующее звено

Передаточная функция:  $W(p) = k/p$ .

Рассмотрим частный случай, когда  $k = 1$ , то есть  $W(p) = 1/p$

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = \frac{1}{\omega} e^{-j\pi/2}$$

$$\text{ВЧХ (вещественная частотная характеристика): } P(\omega) = 0.$$

$$\text{МЧХ (мнимая частотная характеристика): } Q(\omega) = -1/\omega.$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = 1/\omega.$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = -\pi/2.$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20\lg(1/\omega) = -20\lg(\omega)$$

ЧХ показаны на рис.5.4. Все частоты звено пропускает с запаздыванием по фазе на  $\varphi=90^\circ$ . Амплитуда выходного сигнала увеличивается при уменьшении частоты и уменьшается до нуля при росте частоты (звено "заваливает" высокие частоты).

ЛАЧХ представляет собой прямую, проходящую через точку  $L(\omega) = 0$  при  $\omega = 1$ . При увеличении частоты на декаду ордината уменьшается на  $20 \lg 10 = 20 \text{ дБ}$ , то есть наклон ЛАЧХ равен  $-20 \text{ дБ/дек}$  (децибел на декаду).

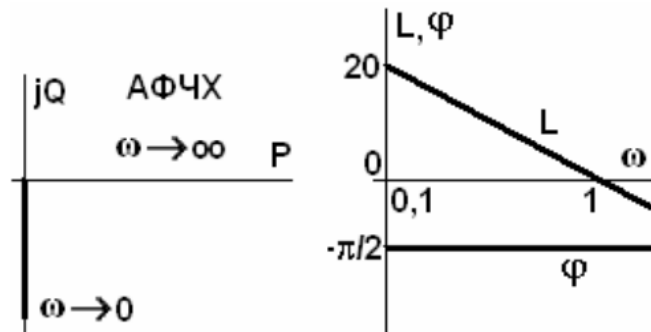


Рис. 5.4 – Частотные характеристики интегрирующего звена.

### 5.2.3 Аperiodическое звено

Для аperiodического звена при  $k = 1$  получаем следующие выражения ЧХ.

Передаточная функция:

$$W(p) = \frac{1}{1+pT};$$

$$\text{АФЧХ: } W(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T} = \frac{1-j\omega T}{1+(\omega T)^2};$$

$$\text{ВЧХ: } P(j\omega) = \frac{1}{1+(\omega T)^2};$$

$$\text{МЧХ: } Q(j\omega) = -\frac{\omega T}{1+(\omega T)^2};$$

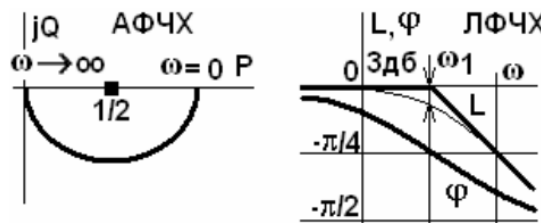


Рис. 5.5 – Частотные характеристики для аperiodического звена.

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T);$$

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1+(\omega T)^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega T}{1+(\omega T)^2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1+(\omega T)^2}{(1+(\omega T)^2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega T)^2}};$$

$$L(\omega) = 20 \lg(A(\omega)) = -10 \lg(1 + (\omega T)^2),$$

Частотные характеристики показаны на рис.5.5. АФЧХ есть полуокружность радиусом  $1/2$  с центром в точке  $P = 1/2$ . При построении асимптотической ЛАЧХ считают, что при  $\omega < \omega_1 = 1/T$  можно пренебречь компонентой  $(\omega T)^2$  в выражении для  $L(\omega)$ , то есть  $L(\omega) \approx 10 \lg 1 = 0$ . При  $\omega > \omega_1$  пренебрегают единицей в выражении в скобках, то есть  $L(\omega) \approx -20 \lg(\omega)$ . Поэтому ЛАЧХ проходит вдоль оси абсцисс до сопрягающей частоты, затем - под наклоном  $-20 \text{ дБ/дек}$ . Частота  $\omega_1$  называется сопрягающей частотой. Максимальное отличие реальных ЛАЧХ от асимптотических не превышает  $3 \text{ дБ}$  при  $\omega = \omega_1$ .

ЛФЧХ асимптотически стремится к нулю при уменьшении  $\omega$  до нуля (чем меньше частота, тем меньше искажения сигнала по фазе) и  $k \rightarrow -\pi/2$  при возрастании  $\omega$  до бесконечности. Перегиб в точке  $\omega = \omega_1$  при  $\varphi(\omega) = -\pi/4$ . ЛФЧХ всех апериодических звеньев имеют одинаковую форму и могут быть построены по типовой кривой с параллельным сдвигом вдоль оси частот.

#### 5.2.4 Правила построения ЧХ элементарных звеньев

При построении ЧХ некоторых звеньев можно использовать “правило зеркала”: при  $k=1$  ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев с обратными передаточными функциями зеркальны относительно горизонтальной оси. Так, на рис.5.6 изображены ЧХ идеального дифференцирующего (а) и идеального форсирующего звеньев (б).

Если  $k \neq 1$ , то передаточную функцию звена можно рассматривать как произведение

$W = kW_1$ , где  $W_1$  - передаточная функция с  $k = 1$ .

При этом амплитуда вектора АФЧХ  $W(j\omega)$  при всех значениях  $\varphi$  должна быть увеличена в  $k$  раз, то есть  $A(\omega) = kA_1(\omega)$ . Центр полуокружности АФЧХ апериодического звена будет находиться не в точке  $P = 1/2$ , а в точке  $k/2$ . ЛАЧХ также изменится:  $L(\omega) = 20\lg A(\omega) = 20\lg kA_1(\omega) = 20\lg k + 20\lg A_1(\omega)$ .

При  $k \neq 1$  ЛАЧХ звена нужно поднять по оси ординат, не меняя ее формы, на  $20\lg k$ . На ЛФЧХ изменение  $k$  никак не отразится. Для примера на рис.5.7 приведены частотные характеристики апериодического звена при  $k = 10$  и  $T = 1$  с. При этом ЛАЧХ апериодического звена с  $k = 1$  поднята вверх на  $20\lg 10 = 20$ .

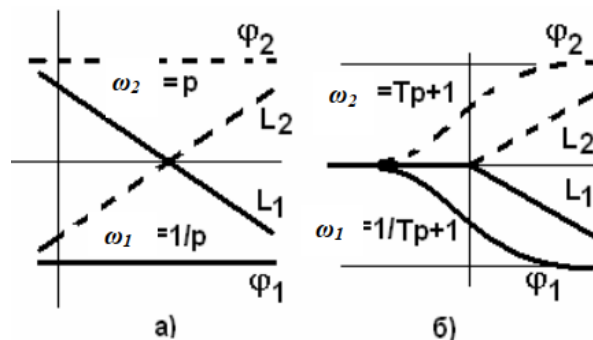


Рис. 5.6 – ЧХ идеального дифференцирующего (а) и идеального форсирующего звеньев (б)

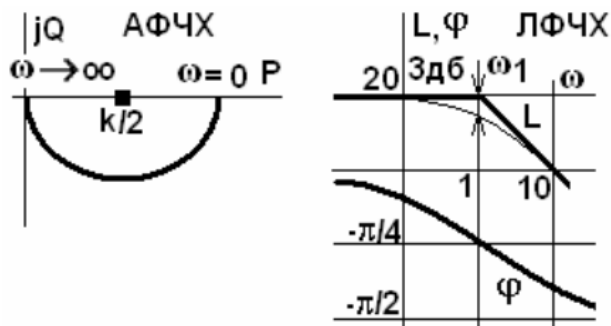


Рис. 5.7 – Частотные характеристики апериодического звена при  $k = 10$  и  $T = 1$ с.

### 5.3. Частотные характеристики разомкнутых одноконтурных САУ

При исследовании и проектировании САУ часто используют АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых систем. Это объясняется тем, что разомкнутые САУ более просто исследовать экспериментально, чем замкнутые. В то же время по ним можно получить исчерпывающую информацию о поведении данной САУ в замкнутом состоянии. Любую многоконтурную САУ можно привести к одноконтурной. Разомкнутая одноконтурная САУ состоит из цепочки последовательно соединенных динамических звеньев. Зная передаточную функцию разомкнутой САУ, можно построить ее ЧХ. И наоборот, зная ЧХ разомкнутой САУ, снятую, например, опытным путем, можно найти ее передаточную функцию. Передаточная функция разомкнутой одноконтурной системы равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p)$$

Заменив в этом выражении  $p$  на  $j\omega$ , получим ее:

$$\text{АФЧХ } W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)}$$

$$\text{АЧХ } A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$$

значит ЛАЧХ равна сумме ЛАЧХ звеньев:

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega)$$

$$\text{ЛФЧХ } \varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)$$

Таким образом, ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ строят путем сложения ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев.

Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуется следующий порядок:

- 1) раскладывают сложную передаточную функцию на множители, являющиеся передаточными функциями типовых динамических звеньев (порядок полиномов числителя и знаменателя не выше второго);
- 2) вычисляют сопрягающие частоты отдельных звеньев и строят асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ каждого элементарного звена;
- 3) путем суммирования ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев строят результирующие ЧХ.

Пример 1:

$$W(p) = 100 \cdot \frac{1}{1+0,1p} \cdot \frac{1}{1+0,01p}; \text{ или } W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p);$$

$$W_1(p) = 100;$$

$$W_2(p) = \frac{1}{1+0,1p};$$

$$W_3(p) = \frac{1}{1+0,01p};$$

Определяем сопрягающие частоты;

$$\omega_1 = 1/T_1 = 1/0,1 = 10 \text{ рад/с}; \quad \omega_2 = 1/T_2 = 1/0,01 = 100 \text{ рад/с}$$

Строим оси (рис. 5.8):

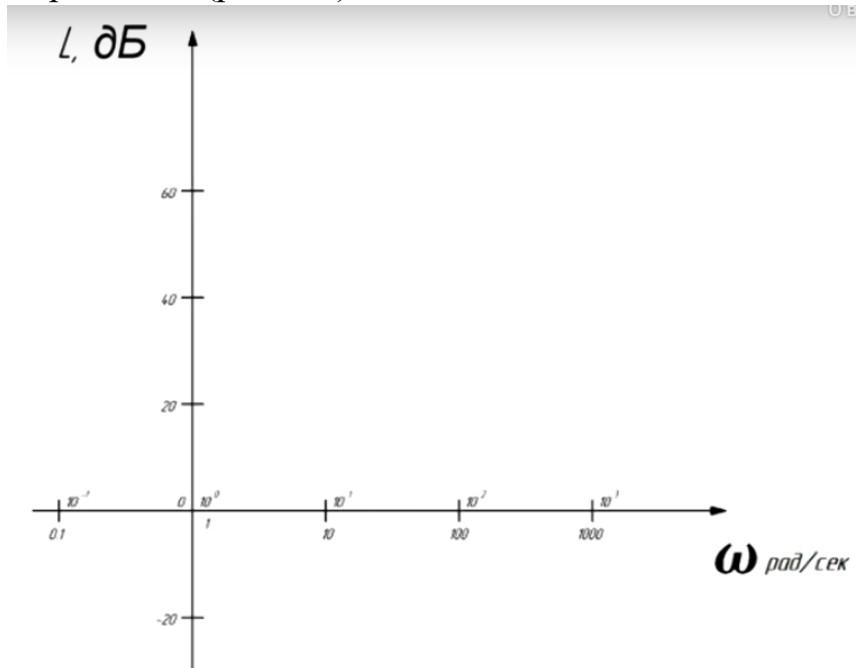
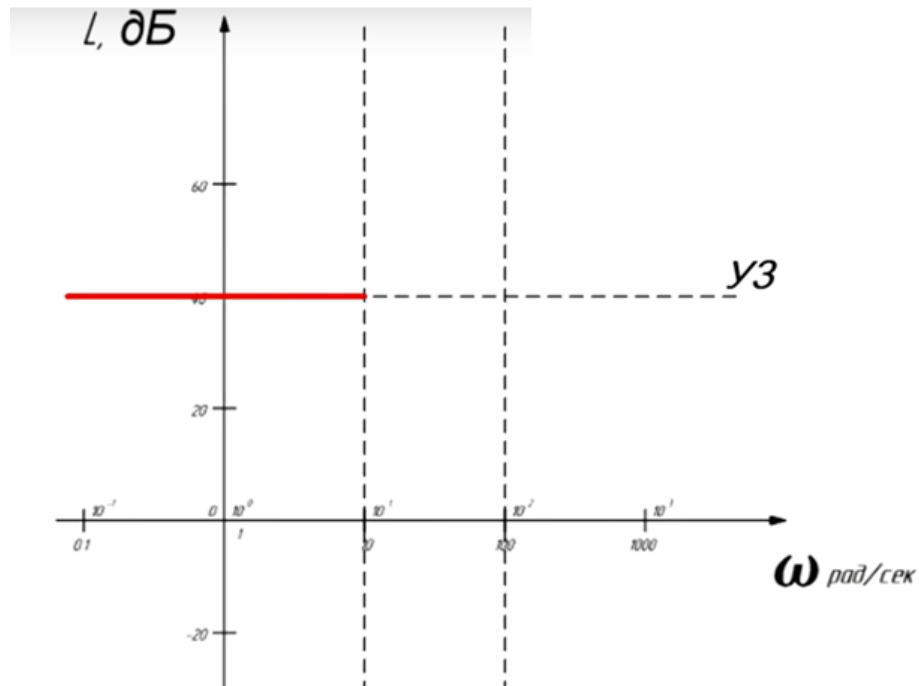


Рис. 5.8 Оси

Отмечаем сопрягающие частоты и рисуем график (рис.5.9) усилительного звена ( $L_1 = 20 \lg 100 = 40 \text{ дБ}$ ):



Рисуем график (рис.5.10) 1-го аperiodического звена  $L_2(\omega)$  с наклоном - 20дб/дек:

*Рис.5.9 Построение ЛАЧХ усилительного звена*

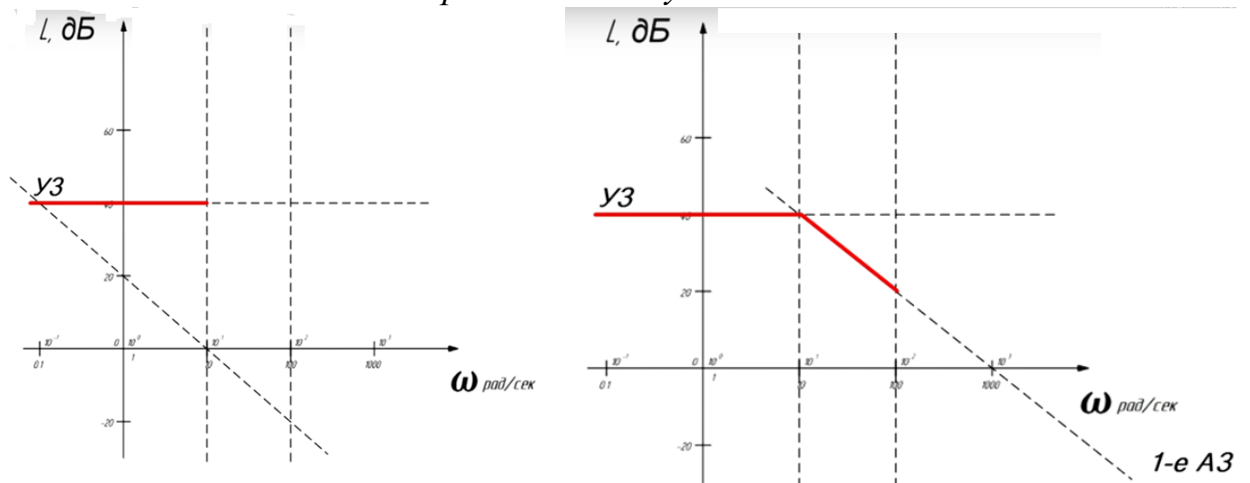


*Рис.5.10 Построение ЛАЧХ 1-го аperiodического звена*

Рисуем график (рис.5.11) 2-го аperiodического звена  $L_3(\omega)$  с наклоном - 20дб/дек и как следствие на 3 участке общий наклон составляет -40дб/дек. Частота, при которой график пересекает ось абсцисс, называется частотой среза (отмечается на графике направлением зеленой стрелки). Далее строим ЛФЧХ (рис.5.12).

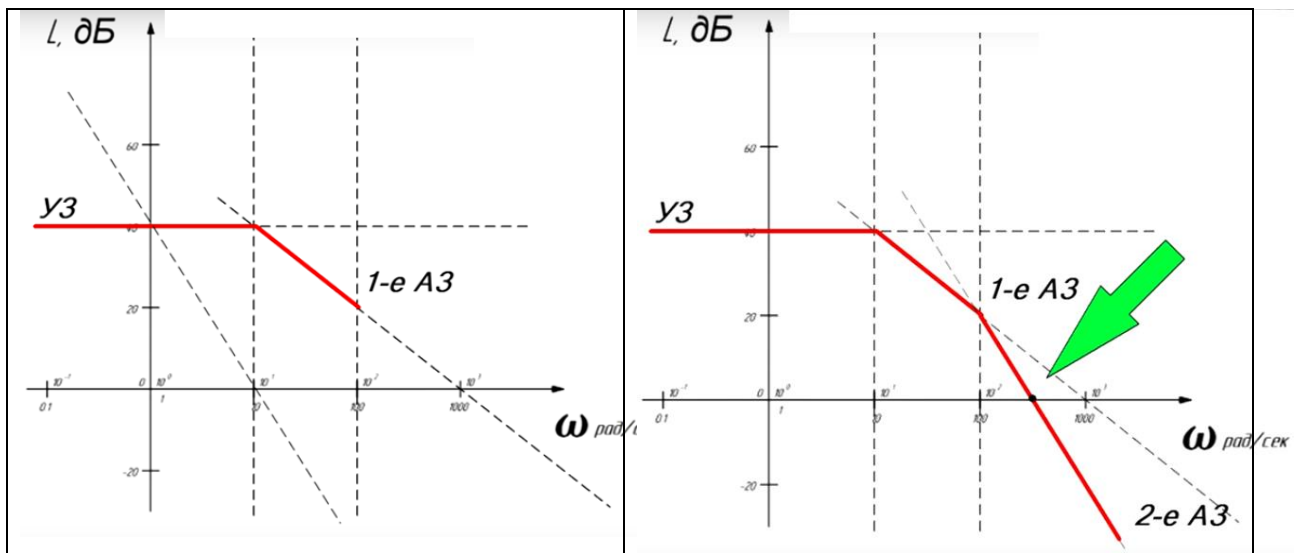


Рис.5.11 Построение ЛАЧХ 2-го аperiodического звена

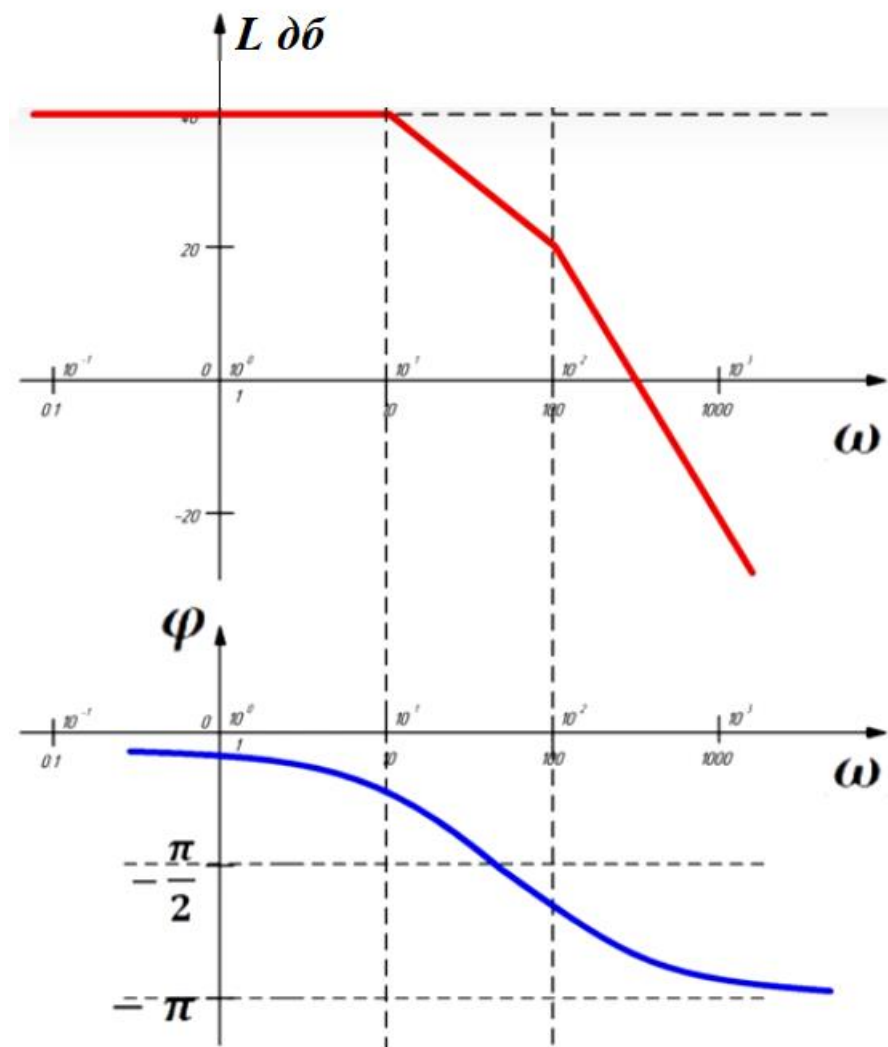


Рис.5.12 Построение ФЧХ

Пример 2:

$$W(p) = \frac{100(p+1)}{p(0,1p+1)} = W_1 W_2 W_3 W_4.$$

Раскладываем данную передаточную функцию на передаточные функции элементарных звеньев:

1) безынерционное звено:

$$W_1 = K_1 = 100 \Rightarrow L(w) = 20\lg 100 = 40;$$

2) форсирующее звено:

$$W_2 = p + 1;$$

его параметры:

$$K_2 = 1, T_2 = 1, \omega_2 = 1/T_2 = 1;$$

3) интегрирующее звено:

$$W_3 = 1/p;$$

его ЛАЧХ проходит через точку  $L = 0$  при частоте  $\omega = 1$ ;

4) апериодическое звено:

$$W_4 = 1/(0.1p + 1);$$

его параметры:  $K_4 = 1, T_4 = 0.1, \omega_4 = 1/T_4 = 10$ .

Порядок построения ЛАЧХ и ЛФЧХ показан на рис.5.13.

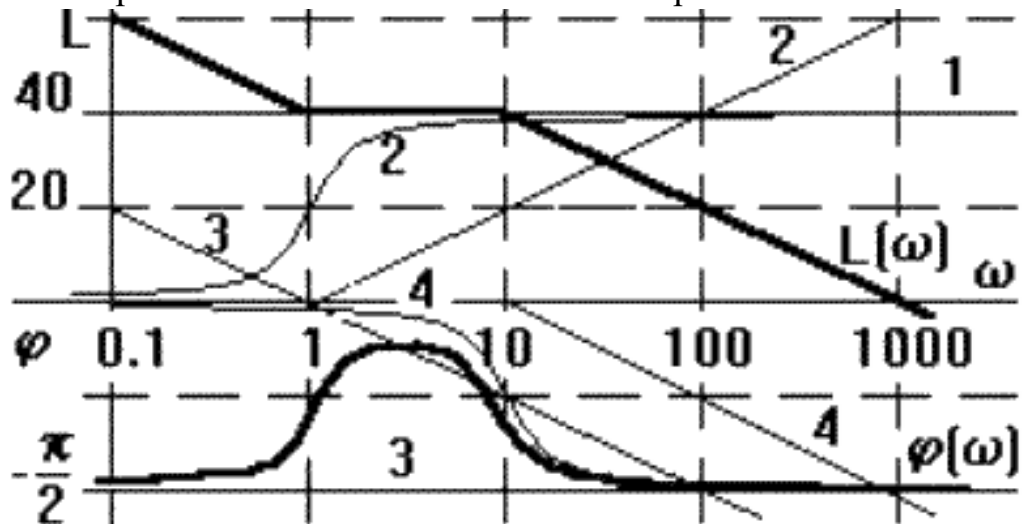


Рис.5.13. Порядок построения ЛАЧХ и ЛФЧХ

### Контрольные вопросы к главе 5.

1. Что называется частотными характеристиками?
2. Как получить частотные характеристики теоретическим путем по известной передаточной функции звена?
3. Что такое и как получить АФЧХ?
4. Что такое и как получить ВЧХ?
5. Что такое и как получить МЧХ?
6. Что такое и как получить АЧХ?
7. Что такое и как получить ФЧХ?
8. Что такое и как получить ЛАЧХ?
9. Что такое и как получить ЛФЧХ?
10. Как построить годограф АФЧХ?

11. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ безынерционного звена.
12. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ интегрирующего звена.
13. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена.
14. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена.
15. Постройте АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ консервативного звена.
16. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ идеального дифференцирующего звена.
17. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ идеального форсирующего звена.
18. Как изменятся ЛАЧХ и ЛФЧХ звена, если коэффициент усиления возрастет в 100 раз?
19. Что представляет собой разомкнутая одноконтурная САУ?
20. Почему для построения ЧХ разомкнутых одноконтурных САУ удобно пользоваться логарифмическими характеристиками?
21. Чем отличается ЛФЧХ от ФЧХ?
22. Как изменится ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой одноконтурной САУ, если коэффициент усиления увеличить в 10 раз?

## Глава 6. Законы регулирования и качество САР

### 6.1. Характеристики объекта управления

Каждый объект регулирования можно охарактеризовать одним или несколькими количественными и качественными параметрами. Такие величины, как производительность, мощность, расход, влажность продукта, скорость и т.д. изменяются в широких пределах. Законы этих изменений во времени произвольны и носят случайный характер. Однако можно выделить ряд величин, которые присущи любому объекту автоматического управления.

*Емкость объекта.* Уравнение динамики объекта регулирования в общем виде можно записать (для бесконечно малого отрезка времени, когда зависимость между входными и выходными параметрами можно считать линейной):  $dy/dt = c \, dE/dt$  где  $dy/dt$  - скорость изменения регулируемого параметра;  $c$  - постоянная объекта, называемая емкостью объекта, характеризующая его способность запасать энергию;  $E = E_1 - E_2$  — подводимая и отводимая к объекту энергия. Если  $dE > 0$ , то в объекте накапливается энергия, что сопровождается увеличением регулируемого параметра  $y$ . Если  $dE < 0$ , то запас энергии в объекте снижается, т. е. регулируемый параметр уменьшается. Для многих объектов величины подводимой и затрачиваемой энергии в той или иной степени зависят от значения регулируемого параметра. Условие  $E_1 = E_2$  соответствует состоянию равновесия объекта. При отклонении регулируемого параметра  $y$  от заданного  $y_0$  в ту или иную сторону равновесие объекта нарушается. Если объект накапливает один вид энергии, то он называется одоемкостным, если несколько — многоемкостным (например, LRC контуры - магнитная, тепловая и электрическая энергия). Механические

объекты, например резервуар, обладают способностью накапливать в себе жидкость, газ, сыпучие тела. Понятие емкости здесь связано с объемом резервуара. Печь, термостат, сушильный шкаф способны накапливать тепло. Понятие их емкости связано с теплоемкостью и т. д.

*Время разгона* — это время, в течение которого регулируемый параметр  $y$  изменяется от нуля до номинального значения  $y$  при максимальном возмущении или управлении при условии, что скорость изменения  $dy/dt$  остается в течение этого времени постоянной, рис. 6.1. Время разгона  $T_p$  может быть определено экспериментально по переходной характеристике  $y(t)$ . Для одноемкостного объекта оно может быть определено как  $T_p = Ta/k$ , где  $Ta$  — постоянная времени объекта;  $k$  — тангенс угла наклона касательной в начальной точке  $t=0$ .

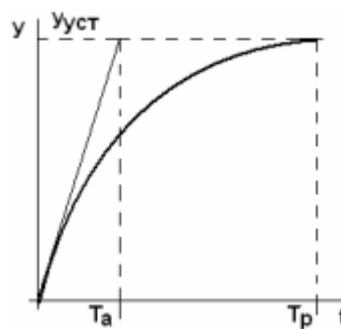


Рис. 6.1 — К определению времени разгона.

*Чувствительность объекта.* Чувствительность, или скорость разгона, объекта представляет величину, обратную времени разгона  $e = 1/T_p$ . Постоянная времени объекта представляет собой время, в течение которого регулируемый параметр достигает нового установившегося значения при неизменных притоке и расходе вещества или энергии для данного объекта, лишенного самовыравнивания. Значение  $Ta$  можно принимать равным  $Ta = (0,25 \dots 0,33) T_p$ . *Самовыравнивание объекта* — это свойство объекта после возникновения возмущения приходить в состояние равновесия без внешнего вмешательства (без регулятора), причем каждому возмущению соответствует свое значение установившегося регулируемого параметра. Оценивается самовыравнивание степенью или коэффициентом самовыравнивания (иногда его называют коэффициентом статизма или саморегулирования).

*Запаздывание в объекте.* Одной из важнейших характеристик объекта регулирования является его запаздывание. Сущность его состоит в том, что с увеличением или уменьшением нагрузки (расходе энергии, вещества) в объекте параметры изменяют свое значение не сразу, а спустя некоторое время с момента возмущения. При этом различают (аналогично, как и для систем автоматического управления) два вида запаздывания: транспортное и переходное, определяемые свойствами объекта.

## 6.2. Законы регулирования

*Закон регулирования* – это закон изменения управляющего параметра, подаваемого на исполнительный механизм. Закон регулирования определяется характеристиками автоматического регулятора, заложенными в его принцип работы. Зависимость выходного сигнала  $Y$  регулятора от входного  $X$  называется статической характеристикой регулятора  $Y(X)$ . Промышленностью выпускаются регуляторы с пятью законами регулирования. Рассмотрим основные типы регуляторов. Регуляторы с *позиционным (релейным) законом регулирования*. Структурная схема позиционной САР показана на рис. 6.2.

Данные типы регуляторов еще называют Т-регуляторами или компараторами. Они бывают с *двухпозиционным и трехпозиционным* законом регулирования. *Двухпозиционные* имеют дискретную выходную величину  $Y$  типа включен/выключен (например, включение/выключение нагревателя). Т-регулятор включает или выключает выходное реле в зависимости от того, достигла или не достигла регулируемая величина  $X$  заданного значения.

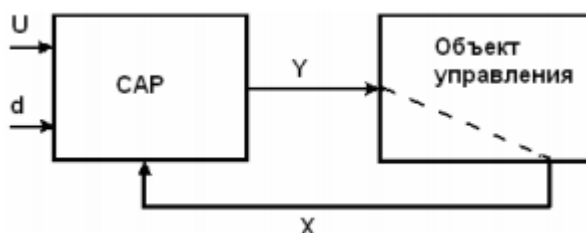


Рис. 6.2 – Структурная схема позиционной САР:  $U, d$  - вектора заданий и зон нечувствительности;  $X, Y$  - вектор регулируемой величины и выходной сигнал регулирования.

Зона нечувствительности  $d$  определяет разницу в величине срабатывания при возрастании сигнала  $X$  и его снижении. Трехпозиционные регуляторы имеют дискретную выходную величину  $Y$  с двумя точками переключения типа включено/выключено. Для определения возможности применения Т-регулятора необходимо знать инерционность - постоянную времени, и время транспортного запаздывания регулируемого объекта. Двухпозиционное Т-регулирование на примере САР с водяным отоплением при управлении подачи теплоносителя задвижкой иллюстрируется на рис.6.3. В здание подается то или иное количество теплоты от котельной. Оно регулируется управляемой задвижкой  $Z$ . В зависимости от объема помещения  $V$ , солнечного тепла и окружающей среды изменяется теплоприток в здание  $G$  и температура в здании  $X$ . САР должна поддерживать температуру в здании постоянной, заданной в автоматическом регуляторе ТР. Пример разгонной характеристики здания приведена на рис.6.4. Датчик температуры ДТ подает электрический сигнал в регулятор ТР, который сравнивает заданную температуру с

действительной в здании. В зависимости от результата сравнения температур подается сигнал на открытие или закрытие заслонки  $Z$ .

Если температура в здании меньше заданной, то заслонка открывается и в здание начинает поступать горячая вода. Температура в здании повышается, достигает необходимой величины и автоматический регулятор отключает задвижку. Горячая вода в здание больше не поступает, температура в нем понижается до минимальной величины, включается регулятор, открывается заслонка и т.д. На вход исполнительного механизма  $Z$  подается ступенчатое воздействие  $Y$ , в результате чего состояние объекта представляет собой некоторый процесс  $X(t)$  – переходную характеристику. Установившееся значение  $X_u$  – это максимальное значение температуры в помещении, достигаемая при данной мощности котельной.

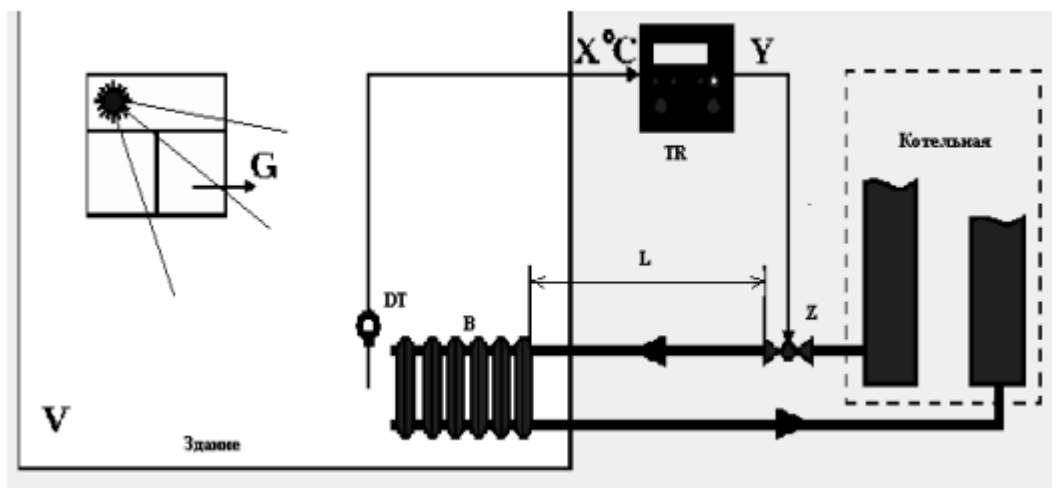


Рис. 6.3 – Блок-схема САР с водяным отоплением здания:

$G$ - теплоприток от солнца и окружающей среды;  $V$ - объем нагреваемого помещения;  $B$ -батареи отопления;  $DT$ - датчик температуры;  $L$ -расстояние от котельной до здания;  $TR$ -автоматический регулятор;  $Z$ - исполнительный механизм - управляемая задвижка теплоносителя;  $X$ - входной регулируемый параметр- температура в здании;  $Y$ - сигнал на исполнительный механизм.

С момента открытия заслонки до момента прихода горячей воды в здание проходит определенное время  $T_a$ . Транспортное запаздывание  $T_a$  - время после включения заслонки, за которое температура в помещении достигнет принятого значения  $0,1X_u$ . Оно определяется временем притока воды в батарею из отопительной сети и временем распространения теплового потока в воздухе помещения. Для экспоненты (без запаздывания) постоянная времени  $T_i$  определяется как время, прошедшее с начала процесса до повышения температуры до величины  $X = 0,63X_u$ . Постоянная времени объекта регулирования  $T_i$  зависит от объема помещения  $V$ . Следовательно, уменьшая длину трубопровода  $L$  и приближая датчик  $DT$  к батарее  $B$ , мы можем снизить

соотношение  $T_u/T_a$  и упростить задачу регулирования. Для регуляторов с релейным выходом на объект подается 100% мощности - заслонка открывается полностью.

Исходя из соотношения  $T_u/T_a$  и выбирается тип регулятора.  $T$ - регулятор можно применять, если  $T_a/T_u < 0,1$ . Выходная величина  $Y$  равна максимальному воздействию (нагреватель включен, заслонка открыта полностью) при рассогласовании

$\varepsilon = X - U$ ,  $Y = 0$  при  $\varepsilon < |d|$ , где:  $U$ - задаваемое регулятору значение температуры, которую необходимо поддерживать в помещении,  $d$  – порог срабатывания регулятора - минимальное значение колебания температуры, которое он может отслеживать с определенной ошибкой регулирования.

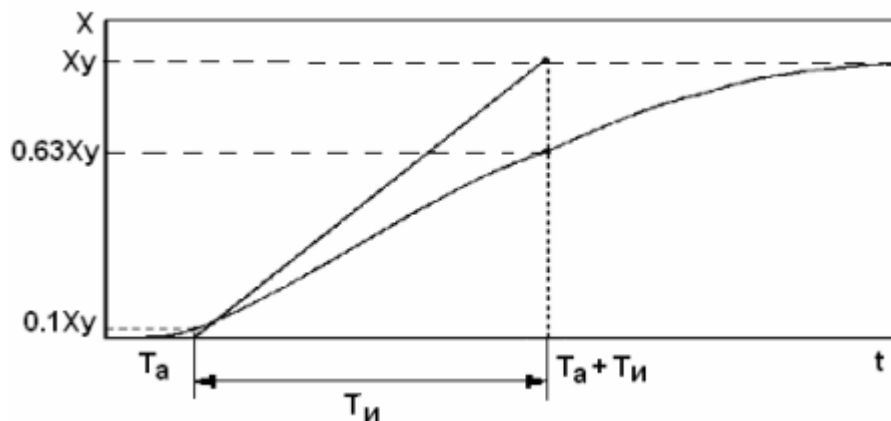


Рис. 6.4 – Переходные процессы для объектов с различными свойствами:

$X$ - входной регулируемый параметр- температура в здании;

$t$ - время процесса;

$T_a$  - время транспортного запаздывания;

$T_{и}$  - постоянная времени объекта;

$X_u$  - установившееся значение температуры в помещении.

Алгоритм регулирования для позиционных регуляторов определяется статической характеристикой регулятора – зависимостью выходного сигнала  $Y$  от входного  $X$  (рис.6.5).

Процесс регулирования представляет собой колебание вокруг задания  $U$  (рис.6.6). Частота и амплитуда определяются величинами  $T_a$ ,  $T_{и}$ ,  $d$ . Пусть заданное значение температуры, которое необходимо поддерживать в помещении  $U_z = 18^\circ\text{C}$ , а порог срабатывания  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Тогда процесс регулирования температуры  $T$  – регулятором будет происходить следующим образом. Пусть первоначально температура в помещении  $U \leq 16^\circ\text{C}$ , т.е. меньше, чем заданная  $U_z = 18^\circ\text{C}$ . Регулятор  $TR$  включен, открыта задвижка  $Z$ , в результате чего горячая вода подается в помещение. Через время  $t_0$  температура начинает повышаться и достигает заданного значения  $U = 18^\circ\text{C}$ . Однако, в силу ее неравномерности по объему помещения, инерционности датчика температуры  $DT$  и наличия порога срабатывания, регулятор сработает несколько позднее того времени, когда температура достигнет заданного

значения. За это время за счет пришедшего “лишнего тепла” температура в помещении поднимется выше заданной, например до  $20^{\circ}\text{C}$ . Этот эффект называется перерегулированием. Регулятор отключается и перекрывает задвижку с теплоносителем. Подача тепла в помещение прекращается.

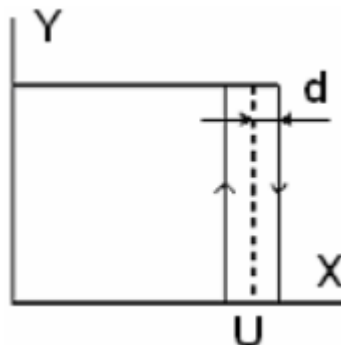


Рис. 6.5 – Статическая характеристика двухпозиционного регулятора.

Помещение начинает остывать. Температура после отключения регулятора (закрытия задвижки) начинает падать. Ее падение продолжается до заданного значения  $18^{\circ}\text{C}$ , и ниже в силу все той же инерционности системы и наличия порога срабатывания. Сработает регулятор только при температуре, например,  $16^{\circ}\text{C}$ , после чего откроется задвижка и горячая вода вновь начнет поступать в помещение и поднимать температуру.



Рис. 6.6 – Процесс регулирования температуры T-регулятором.

Таким образом, температура в помещении будет колебаться вокруг заданной, но не будет равна ей, т.е.  $T$ -регулятор имеет ошибку. Для объектов с большой инерционностью  $Tu$  и с малым запаздыванием  $Ta$  регулирование происходит с постоянными колебаниями, достигающими до 5-15% от  $U$ . Чем больше  $d$ ,  $Tu/Ta$ , тем больше амплитуда колебаний. Чем больше  $Ta$  и  $Tu$ , тем больше период колебаний. Подобные регуляторы используются для регулирования температуры воды в баках, в пастеризаторах, для управления нагревом печей хлебозавода, в сушильных камерах, в саунах и других объектах. Позиционные регуляторы практически неприменимы для систем с существенным транспортным запаздыванием  $Ta > 0,2Tu$  и для объектов без

самовыравнивания, так как регулируемая величина выходит далеко за необходимые пределы регулирования.

*Пропорциональные регуляторы.* В пропорциональном регуляторе входная (рассогласование)  $\varepsilon = U - X$  и выходная величины связаны соотношением  $Y = K \varepsilon$ , где  $K$ - постоянный коэффициент. Рассмотрим принцип действия пропорционального регулятора для разгонной кривой объекта регулирования 1 (рис.6.7), аналогичной разгонной кривой отопления здания (рис.6.4). Выходная величина регулятора  $Y$ , пропорциональная сигналу рассогласования, определяет уровень открытия задвижки - чем больше рассогласование, тем больше открыта заслонка. При данном законе регулирования значение регулируемой величины  $X$  никогда не достигнет задания  $U$ . Всегда имеется *статическая ошибка*  $d = U - X$ . При постоянном коэффициенте  $K$  приближение температуры  $X$  к заданию  $U$  постепенно уменьшает подаваемую тепловую мощность  $Y = K(U - X)$ - заслонка закрывается. Но теплота, рассеиваемая в окружающую среду, при этом увеличивается, и при  $Y = Kd$  наступит равновесие теплопритоков и ошибка  $d$  не достигнет 0, т.к. если  $d$  будет равно 0, то и выходной сигнал (подаваемая котельной тепловая мощность) будет равен нулю,  $Y = 0$ . В результате, чем больше приближается регулируемая величина  $X$  к заданию  $U$ , тем меньше сигнал  $Y$  с САР, и тем меньше под действием окружающей среды стремится регулируемая величина  $X$  к заданию  $U$ . Таким образом, на выходе регулятора устанавливается некоторое значение  $Y = Kd$ , которое приводит регулируемую величину  $X$  в состояние, отличное от задания  $U$ . Чем больше коэффициент  $K$ , тем меньше ошибка  $d$ . При больших значениях  $K$  резко увеличивается величина  $X$  и при значительной величине транспортного запаздывания система переходит в режим автоколебаний (рис.6.6., зависимость 2). При меньшем значении  $K$  регулирование происходит без колебаний (рис.6.6., зависимость 3). При пропорциональном регулировании регулятор реагирует на мгновенное изменение рассогласования. При очень большом коэффициенте усиления  $K$  пропорциональный регулятор вырождается в двухпозиционный регулятор. В ряде случаев, при малом транспортном запаздывании, статическая ошибка не превышает необходимую величину, поэтому П- регуляторы находят некоторое применение.



Рис. 6.7 – Процесс регулирования П – регулятором при скачкообразном изменении задания с 0 до U (разгонная кривая).

Для устранения статической ошибки d при формировании выходной величины Y вводят интегральную (И) составляющую отклонения от задания:

$$Y = K\varepsilon_i + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_i / t_i \text{ или } Y = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau,$$

где  $t_i$  ( $T_i$ ) - постоянная интегрирования сигнала;  $\Delta t_i$  - время между двумя соседними измерениями;  $\sum \varepsilon_i$  - накопленная между двумя соседними измерениями сумма рассогласований.  $K_p$ ,  $K_i$  — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей составляющих регулятора.

В установившемся режиме ( $d = 0$ ) в интеграторе имеется величина  $\sum \varepsilon_i / t_n$ , содержащая в себе накопленную ошибку регулирования, которая является дополнительным источником, ускоряющим регулятор к достижению заданного значения регулируемой величины. Для достижения установившегося режима в интеграторе требуется достаточно большее время. Поэтому ПИ-регулятор можно применять в случае, когда и внешние воздействия достаточно медленные. В случае резких изменений внешних и внутренних факторов (например, налили холодной воды в бак или резко изменили задание) ПИ-регулятору требуется время для компенсации этих изменений. Для ускорения реакции САР на внешние воздействия и изменения в задании в регулятор вводят дифференциальную составляющую (Д):

$$Y = K\varepsilon_i + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_i / t_i + t_d \varepsilon_i / \Delta t_i \text{ или } Y = K_p(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon}{dt}, \text{ где}$$

$t_d$  ( $T_d$ ) - постоянная дифференцирования сигнала;  $K_d$  — коэффициенты усиления дифференциальной составляющей регулятора.

Чем быстрее растет  $\Sigma$ , тем больше  $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_i / t_n$ . Регулятор с таким законом управления называется ПИД-регулятором. Дифференциальная составляющая зависит от скорости изменения рассогласования  $t_d \varepsilon_i / \Delta t_i$ . Она вызывает реакцию регулятора на резкое изменение регулируемого параметра, возникшее, например, для случая нагрева помещения, в результате открытия дверей и окон при сильном холодном ветре.

Подобрав для конкретного объекта  $K$ ,  $t_u$ ,  $t_d$ , можно оптимизировать качество работы регулятора: уменьшить время выхода на задание, снизить влияние внешних возмущений, уменьшить отклонение от задания. При очень большом  $t_i$  регулятор медленно выводит объект на задание. При малом  $t_i$  происходит перерегулирование, т.е. регулируемый параметр  $X$  проскакивает задание, а затем сходится к нему.

В реальных системах применяют различные сочетания ПИД - законов регулирования. Отдельно П, И и Д законы применяются достаточно редко. В зависимости от объекта и необходимого качества регулирования возможны сочетания: ПИ, ПД, ДИ, ПИД.

Выбор регулятора для конкретного объекта зависит от его свойств, которые определяются его динамической характеристикой. П- регуляторы используются в объектах с небольшим запаздыванием и изменением нагрузки, а также в системах, где допускается статическая ошибка и не используются при циклическом изменении параметров объекта. И- регуляторы используются для объектов с самовыравниванием и небольшими запаздыванием и изменением нагрузки. ПИ- регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с большим запаздыванием, а также при больших и медленных изменениях нагрузки. ПИД- регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, при требуемой малой статической ошибке регулирования и при больших запаздываниях в объекте. Двухпозиционные релейные регуляторы рекомендуется применять в объектах с большой емкостью.

### *Настройка регуляторов*

При применении ПИД- регуляторов (рис. 6.8) для каждого конкретного объекта необходимо настраивать от одного до трех коэффициентов. Возможны САР с автоматизированной настройкой. Для типовых регуляторов известны простейшие аналитические и табличные методы настройки (например, две методики Цидлера).

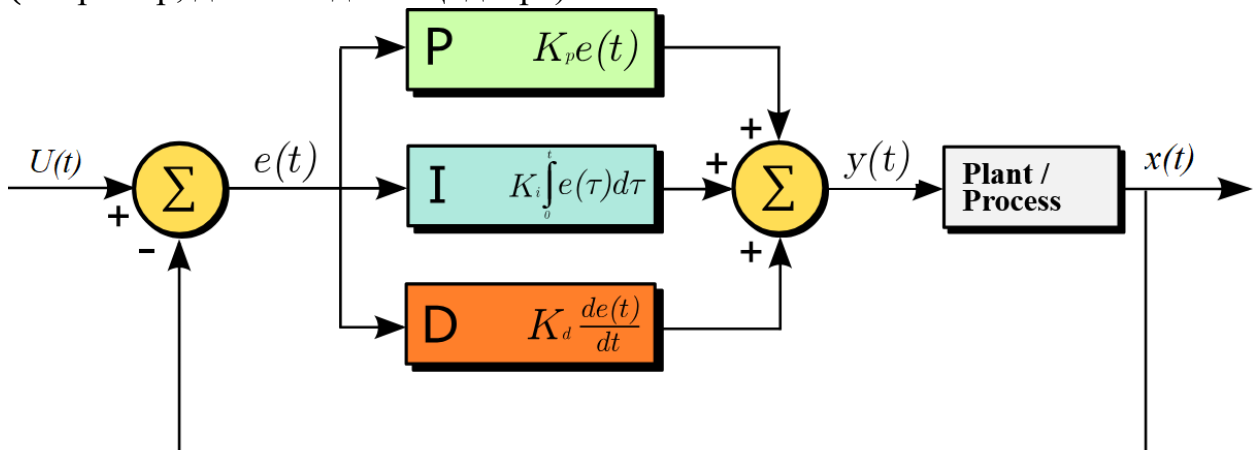


Рис. 6.8 Система управления с обратной связью с участием ПИД-регулятора. Система управляет величиной  $x(t)$ , то есть выводит величину  $x(t)$  на заданное извне значение  $U(t)$ . На вход ПИД-регулятора подаётся ошибка  $e(t)$ , выход ПИД-регулятора является управляющим воздействием  $y(t)$  для некоторого процесса (для объекта управления), управляющего величиной  $x(t)$ .  $K_i = 1/T_u$ ;  $K_d = T_d$ ;  $K_p = K$ . Часто в качестве одного из параметров ПИД-регулятора используется относительный диапазон

$$P_b = 1/K_p$$

#### Настройка по реакции на входной скачок

Алгоритм настройки: - на вход САР подается новое задание (уставка) – регулятор включается, и по переходному процессу  $X(t)$  определяются  $t_0$ ,  $R$ ,  $t_i$  (рис. 6.9):

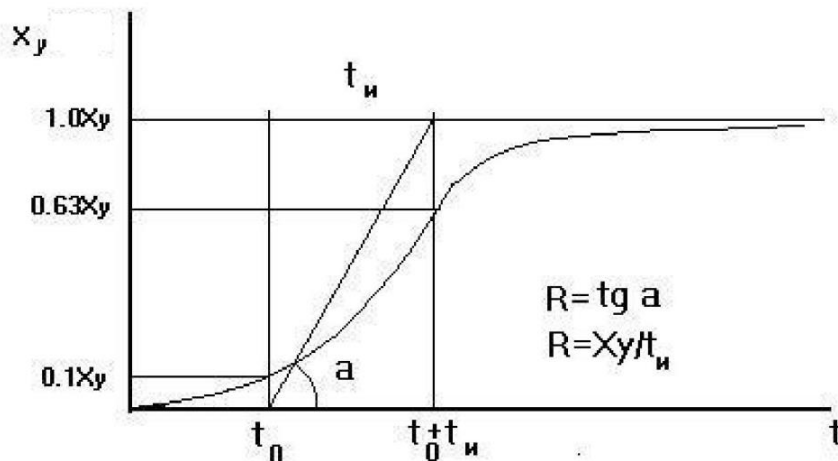


Рис.6.9 Разгонная кривая для объекта с транспортным запаздыванием:

$t_0$  - время транспортного запаздывания;

$t_i$  - постоянная времени (время согласования) определяется инерционностью объекта;

$X_y$  - установившееся значение;

$R$  - наклон разгонной кривой  $dX/dt$  (макс. скорость изменения  $X$ )

- вычисляются коэффициенты настройки согласно следующим примерным соотношениям:

для П-регулятора  $K = 1/R \cdot t_0$

для ПД-регулятора  $K = 1/R \cdot t_0$ ,  $T_d = 0.25 \cdot t_0$

для ПИ-регулятора  $K = 0.8/R \cdot t_0$ ,  $T_i = 3 \cdot t_0$

для ПИД-регулятора  $K = 1.2/R \cdot t_0$ ,  $T_i = 2 \cdot t_0$ ,  $T_d = 0.4 \cdot t_0$ .

Не обязательно выводить объект на максимально возможную величину  $X$ . Однако, следует иметь в виду, что слишком маленький скачок не позволяет определить  $R$  с достаточно высокой точностью.

Настройка по методу максимального коэффициента усиления

Этот способ применяется, если допустим колебательный процесс, при котором значения регулируемой величины значительно выходят за пределы задания  $U$  (рис.6.10).

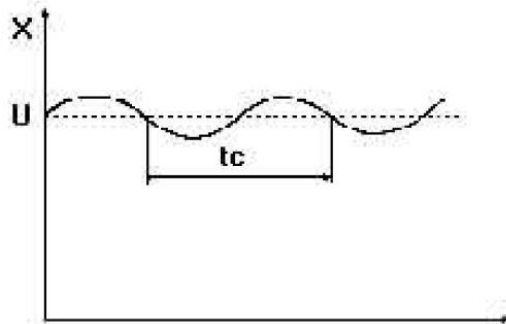


*Рис.6.10 К настройке по методу максимального коэффициента усиления*

Алгоритм настройки: - определяется предельный коэффициент  $K_{\max}$  усиления, при котором САР и объект переходят в колебательный режим, т.е. без интегральной и дифференциальной части ( $T_d=0$ ,  $T_i=\infty$ ). Вначале  $K=0$ , затем он увеличивается до тех пор, пока САР и объект переходит в колебательный режим. САР соответствует схеме on/off (позиционного)-регулятора - определяется период колебаний  $t_c$  (см. рис. 6.10);

- вычисляются коэффициенты настройки согласно следующим примерным соотношениям:

для П-регулятора  $K = 0.5 \cdot K_{\max}$

для ПД-регулятора  $K = 0.5 \cdot K_{\max}$ ,  $T_d = 0.05 \cdot t_c$

для ПИ-регулятора  $K = 0.45 \cdot K_{\max}$ ,  $T_i = 0.8 \cdot t_c$

для ПИД-регулятора  $K = 0.6 \cdot K_{\max}$ ,  $T_i = 0.5 \cdot t_c$ ,  $T_d = 0.12 \cdot t_c$

*Настройка по процессу двухпозиционного регулирования по релейному закону*

Эта методика удобна, если применялся позиционный регулятор, который затем заменяется на ПИД регулятор:

- система переводится в режим двухпозиционного регулирования по релейному закону (см. рис. 6.11); определяется амплитуда -  $A$  и период колебаний  $t_c$ ;

- вычисляются коэффициенты настройки согласно следующим примерным соотношениям:

для П-регулятора  $K = 0.45/A$

для ПД-регулятора  $K = 0.45/A$ ,  $T_d = 0.05 \cdot t_c$

для ПИ-регулятора  $K = 0.4/A$ ,  $T_i = 0.8 \cdot t_c$

для ПИД-регулятора  $K = 0.55/A$ ,  $T_i = 0.5 \cdot t_c$ ,  $T_d = 0.12 \cdot t_c$

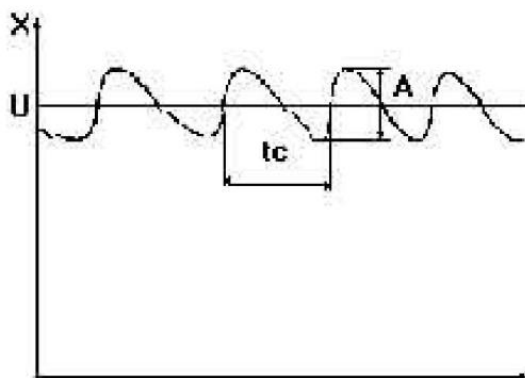


Рис.6.11 К настройке по процессу двухпозиционного регулирования

### **Недостатки использования ПИД-регуляторов**

При использовании ПИД-регулятора в системе регулирования, следует учитывать нежелательные эффекты, возникающие при реализации канала производной сигнала ошибки  $\dot{\epsilon}(t)$ . Недостатки проявляются из-за того, что при усилении этого канала прямо пропорционально возрастает частота. Основными недостатками при этом являются:

- Повышенное усиление высокочастотных составляющих сигнала ошибки. Они носят шумовой характер и из-за этого отношение полезной составляющей управляющего сигнала к шумовой уменьшается, что дестабилизирует объект управления.
- Возникновение импульсов большой амплитуды. Такое явление возникает в моменты скачкообразного изменения ошибки, несмотря на медленное изменение сигнала системы и в связи со скачкообразными изменениями сигнала установки и его проникновением на вход дифференциатора

В современных системах автоматизации, которые, как правило, строятся на базе PLC ПИД-регуляторы реализуются либо как специализированные аппаратные модули, включаемые в состав управляющего контроллера, либо программными методами, с применением специализированных библиотек. Производители контроллеров часто разрабатывают специализированное ПО (тюнеры) для настройки коэффициентов регулятора.

### **Контрольные вопросы к главе 6.**

1. Что называется законом регулирования?
2. Что такое двухпозиционное регулирование?
3. Как реализовать пропорциональный закон регулирования?
4. Зачем в регулятор добавляют дифференцирующие звенья?
5. Зачем в регулятор добавляют интегрирующие звенья?
6. Что такое постоянная регулирования?
7. Дайте определение разгонной характеристики объекта.
8. Дайте определение Т-регулятора.
9. Как влияет постоянная регулирования на время выхода объекта

на заданное значение регулируемой величины?

10. Какие условия оптимального применения П-регулятора?

11. Какие условия оптимального применения ПИ-регулятора?

12. Какие условия оптимального применения ПИД-регулятора?

13. Дайте определение емкости объекта.

14. Чем отличаются одностепенный объект от многостепенного?

15. Дайте определение времени разгона объекта.

16. Дайте определение постоянной времени объекта.

17. Дайте определение чувствительности объекта.

18. Поясните понятие самовыравнивания.

19. Дайте определение запаздывания объекта

20. Настройка регуляторов

21. Настройка по реакции на входной скачок

22. Настройка по методу максимального коэффициента усиления

23. Настройка по процессу двухпозиционного регулирования по релейному закону

### 6.3. Понятие устойчивости системы

Понятие «устойчивость» - важнейшее понятие для САУ. Под устойчивостью системы понимается способность ее возвращаться к состоянию установившегося равновесия после снятия возмущения, нарушившего это равновесие. Неустойчивая система непрерывно удаляется от равновесного состояния или совершает вокруг него колебания с возрастающей амплитудой.

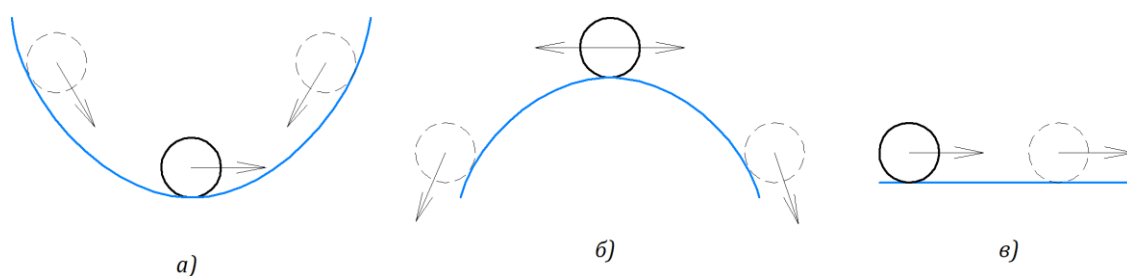


Рис. 6.12 а) абсолютно устойчивое положение, б) неустойчивое положение, в) нейтральное (безразличное) положение.

Устойчивость линейной системы определяется не характером возмущения, а структурой самой системы (рис.6.12.). Говорят, что система устойчива "в малом", если определен факт наличия устойчивости, но не определены ее границы. Система устойчива "в большом" (абсолютно устойчивое положение), когда определены границы устойчивости и то, что реальные отклонения не выходят за эти границы. При возмущающем воздействии на шарик (рис.6.12а) шарик отклоняется от исходного положения и спустя некоторого времени возвращается в исходное (абсолютно устойчивое положение). При возмущающем воздействии на шарик (рис.6.12б) шарик

отклоняется от исходного положения, но больше не возвращается в исходное – система неустойчива. При возмущающем воздействии на шарик (рис.6.12в) шарик отклоняется от исходного положения, но после исчезновения возмущающего воздействия, занимает новое устойчивое положение – нейтральное (безразличное) положение.

В САУ, работающей по отклонению, регулятор изменяет управляющий сигнал после того, как появилось отклонение регулируемого параметра от заданного значения. Следовательно, он должен не только компенсировать возмущающее воздействие, но и свести к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения

При этом могут быть следующие случаи:

1. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал недостаточной мощности. При этом скорость нарастания отклонения регулируемого параметра от заданного значения уменьшается, но само отклонение продолжает расти. График процесса регулирования изменение во времени выходного сигнала  $Y_{вых}(t)$  системы после нанесения на нее возмущающего воздействия – будет расходящийся, а работа САУ -неустойчивой (рис. 6.13б). Отклонение выходной величины  $Y_{вых}(t)$  от установившегося значения  $Y_o(t) = Y_{вых}(t) = 0$   
 $\Delta i = Y_i(t) - Y_o(t)$

увеличивается с течением времени,  $i = 1, 2, 3, \dots$

2. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал избыточной мощности, который не только компенсирует возмущающее воздействие и сводит к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения, но и вызывает новое отклонение  $\Delta i$ , противоположное по знаку и большей амплитуды (рис. 6.13а). График процесса регулирования в такой САУ также будет расходящийся (расходится с заданием), а работа САУ - неустойчивой.

3. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал необходимой мощности. При этом регулируемый параметр или плавно возвращается к заданному значению (апериодический процесс регулирования), или возвращается к нему через колебания уменьшающейся амплитуды (колебательный процесс регулирования). Такие графики процессов регулирования называются сходящимися, а работа САУ будет устойчивой (рис. 6.13в).

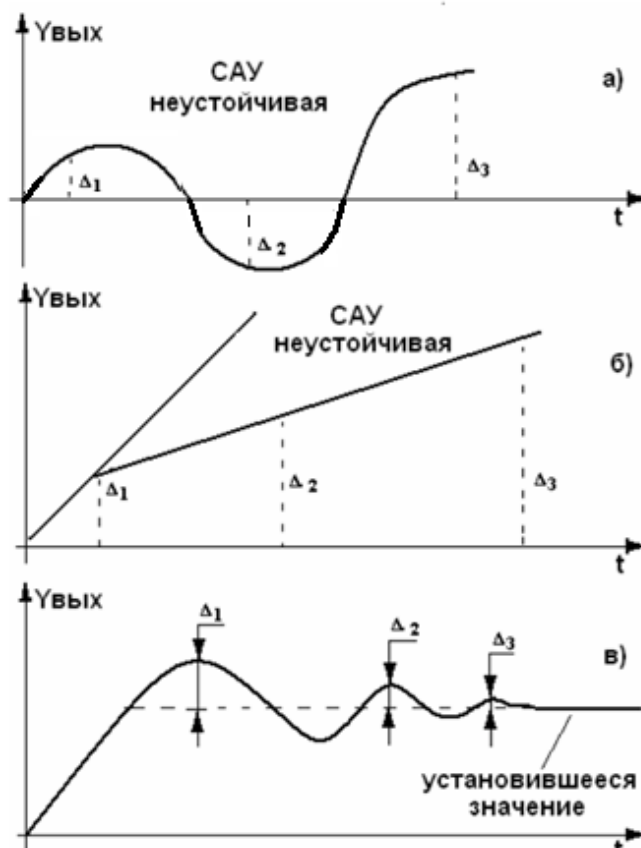


Рисунок 6.13 – Графики процессов регулирования в САУ:

- а) с выходным сигналом регулятора избыточной мощности;
- б) с выходным сигналом регулятора недостаточной мощности;
- в) с выходным сигналом регулятора необходимой мощности.

Неустойчивые системы неработоспособны. Но кроме устойчивости, САУ должна отвечать требованиям по качеству своей работы.

#### 6.4. Основные условия устойчивости

Можно провести аналогию между САУ и пружиной, колебания которой описываются аналогичным дифференциальным уравнением (рис.6.14). В соответствии с классическим методом решение дифференциального уравнения ищется в виде:

$y(t) = y_{\text{вын}}(t) + y_{\text{св}}(t)$ , где  $y_{\text{св}}(t)$  - общее решение однородного дифференциального уравнения, то есть уравнения с нулевой правой частью:  
 $a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} y' + a_n y = 0$ ;

где  $y_{\text{вын}}(t)$  - частное решение неоднородного дифференциального уравнения, под которым понимается уравнение с ненулевой правой частью.

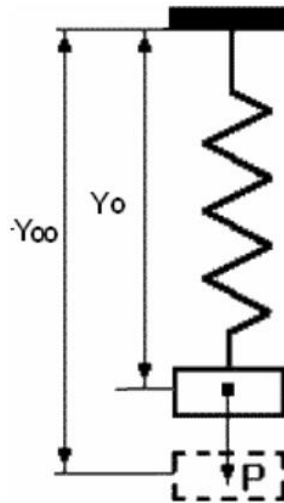


Рис. 6.14 – Колебание пружины.

Для общего решения неоднородного дифференциального уравнения  $y_{св}(t)$ , когда все внешние воздействия сняты и система абсолютно свободна, ее движения определяются лишь собственной структурой. Поэтому решение данного уравнения называется свободной составляющей общего решения. Для частного решения неоднородного дифференциального уравнения  $y_{вын}(t)$  к системе приложено внешнее воздействие  $u(t)$ . Поэтому вторая составляющая общего решения называется вынужденной. Она определяет вынужденный установившийся режим работы системы после окончания переходного процесса. Оттянем пружину, а затем отпустим, предоставив ее самой себе. Пружина будет колебаться в соответствии со свободной составляющей решения уравнения, то есть характер колебаний будет определяться только структурой самой пружины. Если в момент времени  $t = 0$  подвесить к пружине груз, то на свободные колебания наложится внешняя сила  $P$ . После затухания колебаний, описываемых только свободной составляющей общего решения, система перейдет в новый установившийся режим, характеризуемый вынужденной составляющей с начальным положением  $Y_0$  и конечным  $Y_{\infty}$ , рис. 6.14.

$$y_{вын} = y(t \rightarrow \infty)$$

Если внешнее воздействие само будет изменяться по синусоидальному закону  $P = P_0 \sin(\omega t + \varphi)$ , то после затухания переходного процесса система будет совершать вынужденные колебания с той же частотой, что и вынуждающая сила, то есть

$$y_{вын} = y_{max} \sin(\omega t + \varphi).$$

Каждая составляющая общего решения уравнения динамики ищется отдельно. Вынужденная составляющая ищется на основе решения уравнения статики для данной системы для времени  $t$ . Свободная составляющая представляет собой сумму из  $n$  отдельных составляющих:

$$y_{св} = \sum_{i=1}^n A_i e^{p_i t},$$

где  $p_i$  корни характеристического уравнения  $D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0$ .

Корни могут быть либо вещественными  $p_i = \alpha_i$ , либо попарно комплексно сопряженными  $p_i = \alpha_i \pm j\omega_i$ . Постоянные интегрирования  $A_i$  определяются исходя из начальных и конечных условий, подставляя в общее решение значения  $u$ ,  $y$  и их производные в моменты времени  $t = 0$  и  $t \rightarrow \infty$ . Каждому отрицательному вещественному корню соответствует экспоненциально затухающая во времени составляющая  $y_{св}(t)_i$ , каждому положительному – экспоненциально расходящаяся, каждому нулевому корню соответствует  $y_{св}(t)_i = \text{const}$  (рис.6.15.).

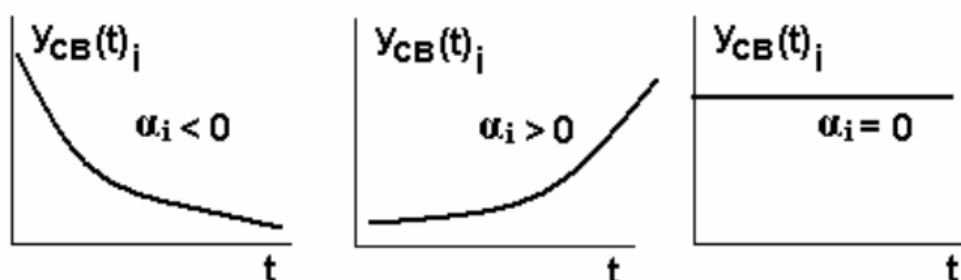


Рис. 6.15 – Соответствие корней характеристического уравнения и изменение  $y_{св}(t)$  свободной составляющей

Пара комплексно-сопряженных корней с отрицательной вещественной частью определяет затухающие колебания с частотой  $\omega_i$  (рис. 6.16а), при положительной вещественной части (6.16б) - расходящиеся колебания, при нулевой – незатухающие (рис.6.16в).

Так как после снятия возмущения  $y_{вын}(t) = 0$ , то устойчивость системы определяется только характером свободной составляющей  $y_{св}(t)$ . Поэтому условие устойчивости систем по Ляпунову формулируется так: *в устойчивой системе свободная составляющая решения уравнения динамики, записанному в отклонениях, должна стремиться к нулю, то есть затухать.*

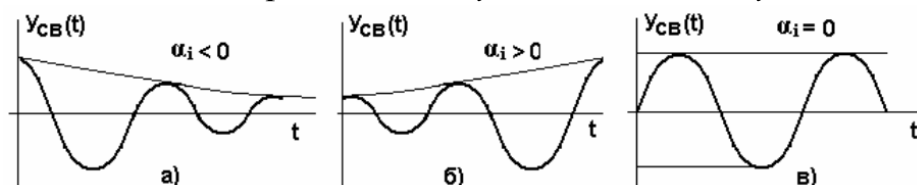


Рис. 6.16 – Характер колебаний при комплексно-сопряженных корнях.

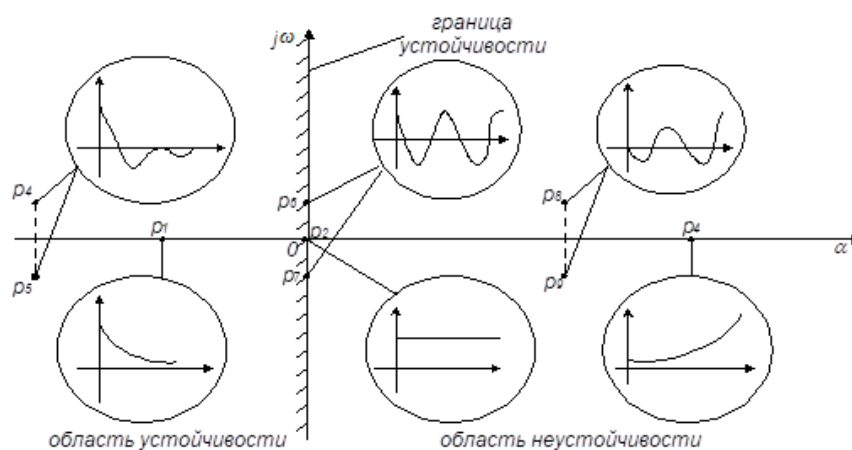


Рис. 6.17. Влияние корней характеристического уравнения АСУ на составляющие ее свободного движения

Исходя из расположения на комплексной плоскости корни с отрицательными вещественными частями называются левыми, с положительными - правыми (рис.6.17.).

Поэтому условие устойчивости линейной САУ можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения были левыми. Если хотя бы один корень правый, то система неустойчива. Если один из корней равен нулю (в системах, где  $a_n = 0$ ), а остальные левые, то система находится на границе апериодической устойчивости.

Если равны нулю вещественные части одной или нескольких пар комплексно-сопряженных корней, то система находится на границе колебательной устойчивости. Правила, позволяющие судить о знаках корней характеристического уравнения без его решения, называются *критериями устойчивости*. Их можно разделить на алгебраические (основаны на составлении по данному характеристическому уравнению по определенным правилам алгебраических выражений) и частотные (основаны на исследовании частотных характеристик). Если система представлена в виде передаточной функции, то для анализа устойчивости используется ее собственный оператор (знаменатель передаточной функции). Полученные корни характеристического уравнения могут быть представлены в виде точек на комплексной плоскости. Для устойчивых систем необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости. Если хотя бы один вещественный корень или пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система является неустойчивой. Если имеется нулевой корень или пара чисто мнимых корней, то система считается нейтральной (находящейся на границе устойчивости и неустойчивости). Таким образом, мнимая ось комплексной плоскости является границей устойчивости. С целью упрощения анализа

устойчивости систем разработан ряд специальных методов, которые получили название критерии устойчивости. Критерии устойчивости делятся на две разновидности: алгебраические и частотные. Алгебраические критерии являются аналитическими, а частотные - графоаналитическими. Критерии устойчивости позволяют оценить влияние параметров системы на ее устойчивость. Необходимое условие устойчивости. Характеристическое уравнение системы с помощью теоремы Виета может быть записано в виде

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = a_0 (p - p_1) (p - p_2) \dots (p - p_n) = 0,$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$  - корни этого уравнения.

Если система устойчива, значит все корни левые, то есть вещественные части всех корней отрицательны, что можно записать как  $\alpha_i = -|\alpha_i| < 0$ . Подставим их в уравнение:  $a_0 (p + |\alpha_1| - j\omega_1) (p + |\alpha_2| - j\omega_2) \dots (p + |\alpha_n| + j\omega_n) \dots = 0$ . Так как в скобках нет ни одного отрицательного числа, то ни один из коэффициентов  $\alpha_i$  не будет отрицательным. Поэтому необходимым условием устойчивости САУ является *положительность всех коэффициентов характеристического уравнения*:  $\alpha_i > 0$ . В дальнейшем будем рассматривать только уравнения, где  $\alpha_0 > 0$ . В противном случае уравнение домножается на -1. Рассмотренное условие является необходимым, но недостаточным условием. Необходимые и достаточные условия дают алгебраические критерии *Рауса и Гурвица*. Раус предложил критерий устойчивости САУ в виде алгоритма, по которому заполняется специальная таблица с использованием коэффициентов характеристического уравнения:

- 1) в первой строке записываются коэффициенты уравнения с четными индексами в порядке их возрастания;
- 2) во второй строке - с нечетными;
- 3) остальные элементы таблицы определяется по формуле:

$$C_{k,i} = C_{k+1,i-2} - r_i C_{k+1,i-1},$$

$$\text{где } r_i = C_{1,i-2}/C_{1,i-1},$$

$i \geq 3$  - номер строки,

$k$  - номер столбца.

- 4) число строк таблицы Рауса на единицу больше порядка характеристического уравнения.

| Ri                    | i\k | 1                              | 2                              | 3                              | 4   |
|-----------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| -                     | 1   | $C_{11} = a_0$                 | $C_{21} = a_2$                 | $C_{31} = a_4$                 | ... |
| -                     | 2   | $C_{12} = a_1$                 | $C_{22} = a_3$                 | $C_{32} = a_5$                 | ... |
| $r_3 = C_{11}/C_{12}$ | 3   | $C_{13} = C_{21} - r_3 C_{22}$ | $C_{23} = C_{31} - r_3 C_{32}$ | $C_{33} = C_{41} - r_3 C_{42}$ | ... |
| $R_4 = C_{12}/C_{13}$ | 4   | $C_{14} = C_{22} - r_4 C_{23}$ | $C_{24} = C_{32} - r_4 C_{33}$ | $C_{34} = C_{42} - r_4 C_{43}$ | ... |

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Критерий Рауса: для того, чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты первого столбца таблицы Рауса  $c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots$  были положительными. Если это не выполняется, то система неустойчива.

Достоинство данного критерия в том, что он прост в использовании независимо от порядка характеристического уравнения. Он удобен для использования на ЭВМ. Его недостаток – малая наглядность, трудно судить о степени устойчивости системы, насколько далеко отстоит она от границы устойчивости.

Критерий Гурвица. Гурвиц предложил другой критерий устойчивости. Из коэффициентов характеристического уравнения строится определитель Гурвица.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & a_9 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & a_8 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

по алгоритму:

- 1) по главной диагонали слева направо выставляются все коэффициенты характеристического уравнения от  $a_1$  до  $a_n$ ;
- 2) от каждого элемента диагонали вверх и вниз достраиваются столбцы определителя так, чтобы индексы убывали сверху вниз;
- 3) на место коэффициентов с индексами меньше нуля или больше  $n$  ставятся нули.

Критерий Гурвица:

для того, чтобы САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все  $n$  диагональных миноров определителя Гурвица были положительны.

Эти миноры называются определителями Гурвица. Рассмотрим примеры применения критерия Гурвица:

1)  $n = 1$

уравнение динамики:

$$a_0 p + a_1 = 0.$$

Определитель Гурвица:  $\Delta_1 = a_1 > 0$  при  $a_0 > 0$ ,

2)  $n = 2$

уравнение динамики:

$$a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0.$$

Определители Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = a_1 a_2 > 0,$$

так как  $a_3 = 0$ , то есть условие устойчивости:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0;$$

3)  $n = 3 \Rightarrow$  уравнение динамики:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Определители Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0,$$

$$\text{условие устойчивости: } a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Таким образом, при  $n \leq 2$  положительность коэффициентов характеристического уравнения является необходимым и достаточным условием устойчивости САУ. При  $n > 2$  появляются дополнительные условия. Критерий Гурвица применяют при  $n \leq 4$ . При больших порядках возрастает число определителей и процесс становится трудоемким. Недостаток критерия Гурвица - малая наглядность. Достоинство - удобен для реализации на ЭВМ. Его часто используют для определения влияния одного из параметров САУ на ее устойчивость. Так равенство нулю главного определителя  $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1} = 0$  говорит о том, что система находится на границе устойчивости.

При этом либо  $a_n = 0$  - при выполнении остальных условий система находится на границе апериодической устойчивости, либо предпоследний минор  $\Delta_{n-1} = 0$  - при положительности всех остальных миноров система находится на границе колебательной устойчивости.

Контрольные вопросы к главе 6.

1. Что понимают под устойчивостью САУ в малом и в большом?
2. Какой вид имеет решение уравнения динамики САУ?
3. Как найти вынужденную составляющую решения уравнения динамики САУ?
4. Какой вид имеет свободная составляющая решения уравнения динамики САУ?
5. Что такое характеристическое уравнение?
6. Какой вид имеют корни характеристического уравнения?
7. Чем отличаются правые и левые корни характеристического уравнения?
8. Сформулируйте условие устойчивости систем по Ляпунову.
9. Что такое граница устойчивости?
10. Что такое критерии устойчивости?
11. Сформулируйте необходимое условие устойчивости САУ.
12. Сформулируйте критерий Рауса.
13. Сформулируйте критерий Гурвица.
14. В чем достоинства и недостатки алгебраических критериев устойчивости?

## 6.5. Частотные критерии устойчивости САУ

Это графоаналитические методы, позволяющие по виду частотных характеристик САУ судить об их устойчивости. Их общее достоинство в простой геометрической интерпретации, наглядности и в отсутствии ограничений на порядок дифференциального уравнения. Запишем характеристическое уравнение САУ в виде

$$D(p) = a_0 (p - p_1) (p - p_2) \dots (p - p_n) = 0.$$

Его корни

$$P_i = \alpha_i + j\omega_i = |p_i|e^{j\arg(p_i)},$$

где  $\arg(p_i) = \arctg(\omega_i/\alpha_i) + k\pi$ ;

$$|p_i| = \sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2}$$

Каждый корень можно изобразить вектором на комплексной плоскости (рис.6.18а), тогда разность  $p - p_i$  изобразится разностью векторов (рис.6.18б), где  $p$  - любое число.

Если менять значение  $p$  произвольным образом, то конец вектора  $p - p_i$  будет перемещаться по комплексной плоскости, а его начало будет оставаться неподвижным, так как  $p_i$  — это конкретное неизменное значение. В частном случае, если на вход системы подавать гармонические колебания с различной частотой  $\omega$ , то  $p = j\omega$ , а характеристическое уравнение принимает вид:

$$D(j\omega) = a_0 (j\omega - p_1) (j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n).$$

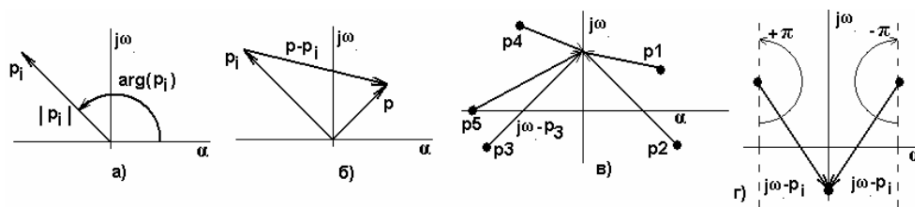


Рис. 6.18. К определению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

При этом концы векторов  $j\omega - p_i$  будут находиться на мнимой оси (рис.6.18в). Если менять  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$ , то каждый вектор  $j\omega - p_i$  будет поворачиваться относительно своего начала  $p_i$  на угол  $+\pi$  для левых и  $-\pi$  для правых корней (рис.6.18г). Характеристическое уравнение можно представить в виде

$$D(j\omega) = |D(j\omega)|e^{j\arg(D(j\omega))},$$

$$\text{где } |D(j\omega)| = a_0 |j\omega - p_1| |j\omega - p_2| \dots |j\omega - p_n|,$$

$$\arg(D(j\omega)) = \arg(j\omega - p_1) + \arg(j\omega - p_2) + \dots + \arg(j\omega - p_n).$$

Пусть из  $n$  корней  $m$  - правые, а  $(n - m)$  - левые, тогда угол поворота вектора

$D(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  равен

$$\Delta \arg(D(j\omega))|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = \sum_{i=1}^n \arg(j\omega - p_i) = (n - m)\pi - m\pi$$

или при изменении  $\omega$  от  $0$  до  $+\infty$  получаем

$$\Delta \arg(D(j\omega))|_{\omega=0}^{\omega=+\infty} = (n - 2m) (\pi / 2)$$

Отсюда вытекает правило: изменение аргумента вектора  $D(j\omega)$  при изменении частоты от  $-\infty$  до  $+\infty$  равно разности между числом левых и правых корней уравнения  $D(p) = 0$ , умноженному на  $\pi$ , а при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  эта разность умножается на  $\pi / 2$ .

Это правило называется принцип аргумента. Он положен в основе всех частотных критериев устойчивости. Мы рассмотрим два наиболее распространенных критерия: критерий Михайлова и критерий Найквиста.

**Критерий устойчивости Михайлова.** Так как для устойчивой САУ число правых корней  $m = 0$ , то угол поворота вектора  $D(j\omega)$  составит

$$\Delta \arg(D(j\omega))|_{\omega=0}^{\omega=+\infty} = n \cdot \pi / 2$$

САУ будет устойчива, если вектор  $D(j\omega)$  при изменении частоты от 0 до  $+\infty$  повернется на угол  $n \pi / 2$ .

При этом конец вектора опишет кривую, называемую годографом Михайлова. Она начинается на положительной полуоси, так как  $D(0) = a_n$ , и последовательно проходит против часовой стрелки  $n$  квадрантов комплексной плоскости, уходя в бесконечность в  $n$ -ом квадранте (рис.6.19а).

Если это правило нарушается (например, число проходимых кривой квадрантов не равно  $n$ ), или нарушается последовательность прохождения квадрантов (рис.6.19б), то такая САУ неустойчива — это и есть необходимое и достаточное условие критерия Михайлова. Этот критерий удобен своей наглядностью. Так, если кривая проходит вблизи начала координат, то САУ находится вблизи границы устойчивости и наоборот. Этим критерием удобно пользоваться, если известно уравнение замкнутой САУ. Для облегчения построения годографа Михайлова выражение для  $D(j\omega)$  представляют суммой вещественной и мнимой составляющих:

$$D(j\omega) = a_0(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)...(j\omega - p_n) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + ... + a_n = \text{Re}D(j\omega) + j\text{Im}D(j\omega),$$

где:

$$\text{Re}D(j\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - ... ,$$

$$\text{Im}D(j\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - ... .$$

Меняя  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , по этим формулам находят координаты точек годографа, которые соединяют плавной линией.

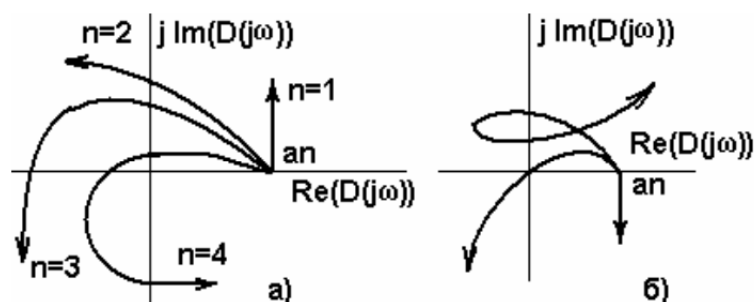


Рис. 6.19 – Годограф Михайлова.

*Критерий устойчивости Найквиста.* Этот критерий позволяет судить об устойчивости замкнутой САУ по виду АФЧХ разомкнутой САУ (рис.6.20). Исследование разомкнутой САУ проще, чем замкнутой. Его можно производить экспериментально, поэтому часто оказывается, что АФЧХ разомкнутой САУ мы имеем или можем получить.

Рассмотрение критерия Найквиста выполним для различных состояний разомкнутой САУ, а именно:

- разомкнутая САУ устойчива;
- разомкнутая САУ неустойчива;
- разомкнутая САУ находится на апериодической границе (нейтральна);
- разомкнутая САУ находится на колебательной границе (имеет 2 чисто мнимых полюса);

Передаточная функция разомкнутой САУ:

$$W_p(p) = K_p(p)/D_p(p)$$

и ее уравнение динамики:

$$Y(p) = \frac{K_p(p)}{D_p(p)} \cdot \varepsilon(p)$$

Или

$$D_p(p) \cdot y(p) = K_p(p) \cdot \varepsilon(p),$$

где  $D_p(p)$  – характеристическое уравнение разомкнутой САУ;

$K_p(p)$  – операторный коэффициент передачи разомкнутой САУ;

$\varepsilon(t)$  – рассогласование на входе разомкнутой САУ.

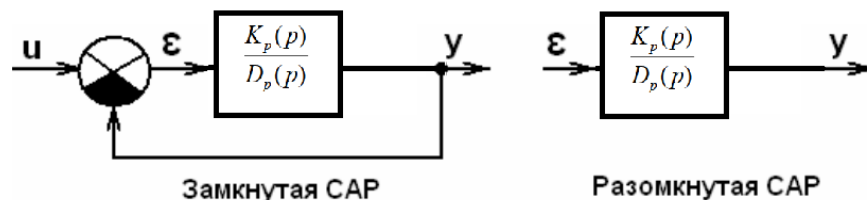


Рис. 6.20 – К использованию критерия устойчивости Найквиста

По виду корней уравнения  $D_p(p) = 0$  можно судить об устойчивости разомкнутой САУ. Но это пока ничего не говорит об устойчивости замкнутой САУ.

Получим характеристическое уравнение *типовой замкнутой САУ*, схема которой приведена на рис.6.20.

Ее уравнение движения

$$Y(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} \cdot U(p)$$

или с учетом обозначения  $W_p(p)$

$$Y(p) = \frac{K_p(p)}{K_p(p) + D_p(p)} U(p)$$

Полагая в уравнении  $U(p) = 0$ , записываем уравнение свободного движения САУ

$$[D_p(p) + K_p(p)] Y(p) = 0$$

Тогда искомое характеристическое уравнение замкнутой САУ

$$D_3(p) = D_p(p) + K_p(p) = 0$$

По виду его корней уже можно судить об устойчивости замкнутой САУ. Воспользуемся вспомогательной функцией:

$$F(j\omega) = 1 + W_p(j\omega) = 1 + \frac{K_p(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{D_p(j\omega) + K_p(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{D_3(j\omega)}{D_p(j\omega)}$$

По сути дела, она представляет собой АФЧХ разомкнутой САУ, сдвинутую на единицу вправо. Степени полиномов  $D_3(j\omega)$  и  $D_p(j\omega)$  равны  $n$ . Эти полиномы имеют свои корни  $p_{zi}$  и  $p_{pi}$ , то есть можно записать:

$$F(j\omega) = \frac{D_3(j\omega)}{D_p(j\omega)} = \frac{|D_3|}{|D_p|} e^{j(\arg D_3 - \arg D_p)}$$

Каждую разность  $(j\omega - p_i)$  в скобках можно представить вектором на комплексной плоскости, конец которого скользит по мнимой оси  $\omega$ . При изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  каждый из векторов  $j\omega - p_i$  будет поворачиваться на угол  $+\pi$ , если корень левый и  $-\pi$ , если корень правый.

Пусть полином  $D_3(j\omega)$  имеет  $m$  правых корней и  $n-m$  левых, а полином  $D_p(j\omega)$  имеет  $g$  правых корней и  $n-g$  левых (рис. 6.21)

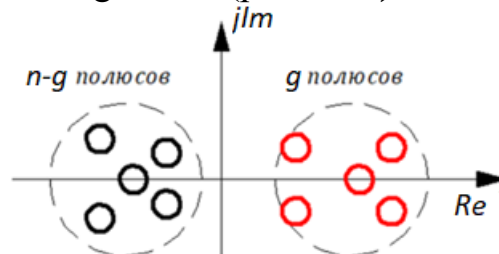


Рис. 6.21 Расположение корней разомкнутой САУ

Тогда суммарный угол поворота вектора функции  $F(j\omega)$  при изменении частоты  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$ :

$$\begin{aligned} \Delta \arg(F(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} &= \Delta \arg(D_3(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} - \Delta \arg(D_p(j\omega)) \Big|_{\omega=-\infty}^{\omega=+\infty} = \\ &= \pi [(n-m) - m] - \pi [(n-g) - g] = 2\pi (g-m). \end{aligned}$$

Если замкнутая САУ устойчива, то  $m = 0$ , тогда суммарный поворот вектора  $F(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  должен быть равен  $2\pi g$ , а при изменении  $\omega$  от 0 до  $+\infty$  он составит  $2\pi g/2$ .

Отсюда можно сформулировать критерий устойчивости Найквиста: *если разомкнутая САУ неустойчива и имеет  $g$  правых корней, то для того чтобы замкнутая САУ была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы вектор*

$F(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от 0 до  $+\infty$  охватывал начало координат в положительном направлении  $g/2$  раз, то есть АФЧХ разомкнутой САУ должна охватывать  $g/2$  раз точку  $\{-1, j0\}$

или

Для устойчивости замкнутой САУ, неустойчивой в разомкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы годограф системы охватывал точку  $\{-1, j0\}$  против часовой стрелки на угол, равный  $\pi g$ , где количество полюсов в правой полуплоскости для разомкнутой САУ (рис. 6.22).

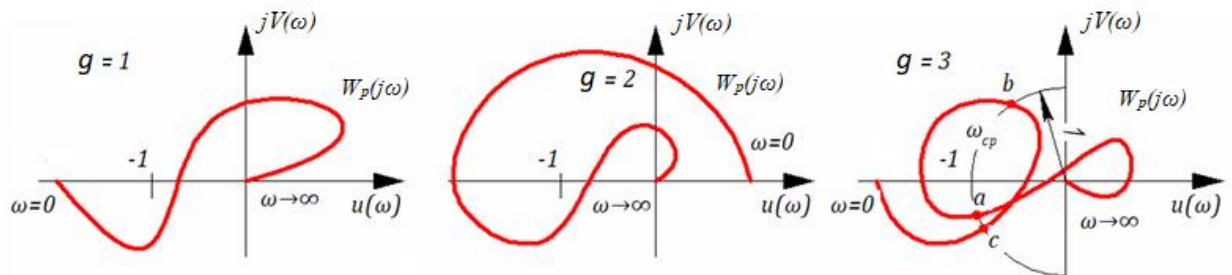


Рисунок 6.22. Примеры годографа устойчивых САУ

Если разомкнутая система устойчива или нейтральна или имеет 2 чисто мнимых полюса то для того, чтобы замкнутая система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  не охватывала точку с координатами  $\{-1, j0\}$  (рис.6.23, рис.6.24)

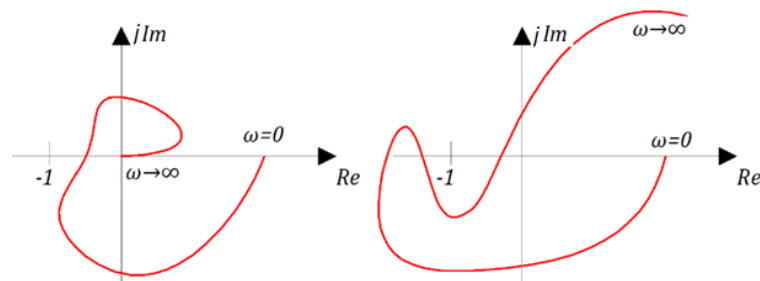


Рисунок 6.23. Годограф устойчивой разомкнутой САУ

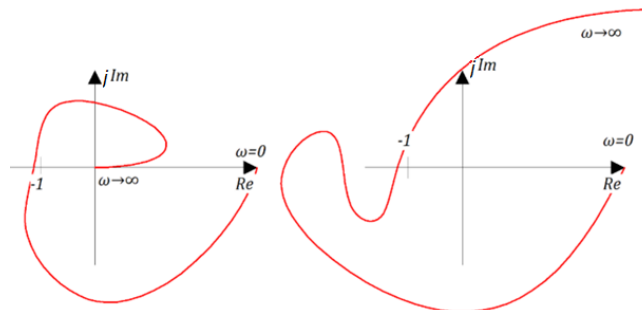


Рисунок 6.24. Примеры годографов неустойчивых САУ

**Понятие о запасах устойчивости по амплитуде и фазе.**

Главной особенностью частотного критерия Найквиста является то, что с его помощью можно определить не только устойчива или нет САУ, но и определить запас устойчивости (до колебательной границы), а точнее запасы устойчивости по фазе и амплитуде. Графическая иллюстрация запасов приведена на рисунке 6.25.

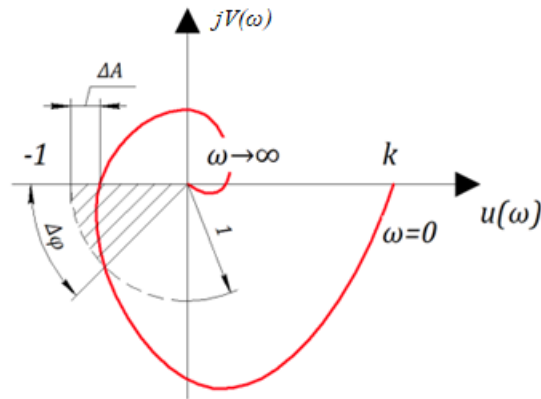


Рис. 6.25. Запасы устойчивости по фазе и амплитуде

**ΔA-запас по амплитуде** - показывает на сколько можно увеличить коэффициент усиления разомкнутой САУ, чтобы замкнутая САУ оставалась устойчивой. Обычно запас по амплитуде выражают в децибелах. Считается нормальным, если запас по амплитуде составляет  $\approx (30 \div 60)$  дБ

**Δφ - запас по фазе** - показывает, насколько можно увеличить сдвиг по фазе, разомкнутой САУ, чтобы замкнутая САУ оставалась устойчивой.

Обычно чем меньше, тем более колебательным является переходной процесс в замкнутой САУ (рис. 6.26).

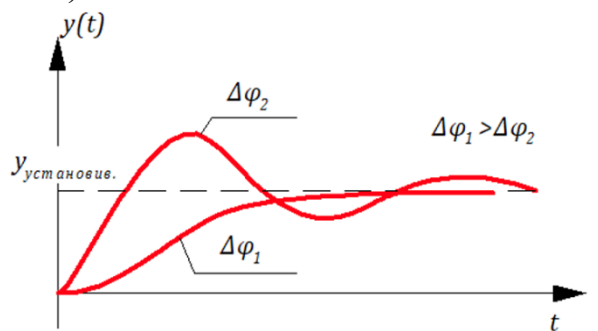


Рис. 6.26 Переходные процессы устойчивых САУ

Для обеспечения незначительной колебательности (или полного ее отсутствия) запас по фазе должен составлять не менее 30...45 градусов.

### Влияние структуры и параметров САУ на устойчивость

Устойчивость САУ зависит как от вида ее характеристического уравнения, так и от конкретных числовых значений коэффициентов уравнения. Существуют системы, которые неустойчивы при любых значениях параметров. Такие системы называют **структурно неустойчивыми**. Структурно неустойчивую систему можно сделать устойчивой, только изменив ее структуру. У структурно неустойчивой системы в пространстве любых ее параметров

области устойчивости не существует. Таковой, например, является АСУ, алгоритмическая схема которой приведена на рис. 6.27. В ней  $T$  и  $k$  – соответственно постоянная времени и передаточный коэффициент инерционного звена.

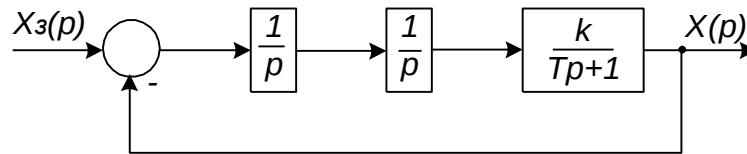


Рис. 6.27 Структурная схема структурно неустойчивой САУ

Характеристическое уравнение такой системы, имеет вид

$$Tp^3 + p^2 + k = 0$$

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

Составим матрицу Гурвица:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & k & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & k \end{vmatrix}$$

Согласно критерию Гурвица

$$\Delta_1 = a_1 = 1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & k \\ T & 0 \end{vmatrix} = 1 \cdot 0 - T \cdot k = -T \cdot k < 0;$$

$$\Delta_3 = a_3 \cdot \Delta_2 = k \cdot \Delta_2 < 0$$

Однако ни при каких значениях постоянной времени  $T$  и передаточного коэффициента  $k$  определитель  $\Delta_2$  не может быть положительным. Поэтому рассматриваемая система является структурно неустойчивой.

Существуют **общие рекомендации** по влиянию на структурную устойчивость одноконтурной АСУ:

- звенья, уменьшающие инерционность системы, способствуют ее устойчивости (например, форсирующее звено первого порядка);
- звенья, увеличивающие инерционность системы, способствуют ее неустойчивости (например, идеальные интегрирующее и колебательное звенья).

## 6.6. Качество регулирования САУ

Качество регулирования состоит из трех основных частей:

- устойчивость;
- точность;

- качество переходного процесса.

Причем главным – несомненно является устойчивость, т.к. если САУ – неустойчива, то говорить о точности и тем более, о качестве переходного процесса нет смысла. На практике часто о качестве систем автоматического регулирования сложными технологическими процессами судят в первую очередь по их функциональным свойствам - совокупности точности в установившемся режиме и качества переходных процессов. Затухание переходных процессов в САУ, является необходимым, но далеко не достаточным условием практической пригодности системы. Необходимо учитывать такие показатели процессов регулирования, как длительность, колебательность, собственную частоту колебаний и т.д.

Качество регулирования численно может быть оценено прямыми показателями качества, которые можно определить непосредственно из кривых переходных процессов САУ. Проблема определения прямых показателей качества переходных процессов с математической точки зрения сводится к построению переходного процесса путем отыскания общего решения неоднородного дифференциального уравнения, описывающего систему при заданных начальных условиях и воздействиях, что для линейных стационарных систем не представляет больших трудностей. Но для систем, описываемых уравнениями выше третьего порядка или нелинейными, получить решение инженерными методами не всегда возможно или оно оказывается трудоемким. Поэтому в теории регулирования большое применение находят приближенные методы анализа переходных процессов по косвенным критериям качества, позволяющим оценить характеристики переходного процесса без непосредственного решения дифференциальных уравнений системы. К ним относятся три вида: частотные, корневые, интегральные.

К основным прямым оценкам относятся следующие:  $\sigma$  – перерегулирование,  $t_n$  – время регулирования,  $d$  – декремент затухания,  $\omega_0$  – частота колебаний,  $n$  – число колебаний, которое имеет переходная характеристика за время регулирования  $t_n$ ,  $t_p$  – время первого достижения установившегося значения переходного процесса,  $t_m$  – время достижения первого максимума.

Рассмотрим основные показатели качества систем управления, пользуясь характеристикой переходного процесса отработки единичного задающего воздействия  $1(t)$ , показанной на рис.6.28.

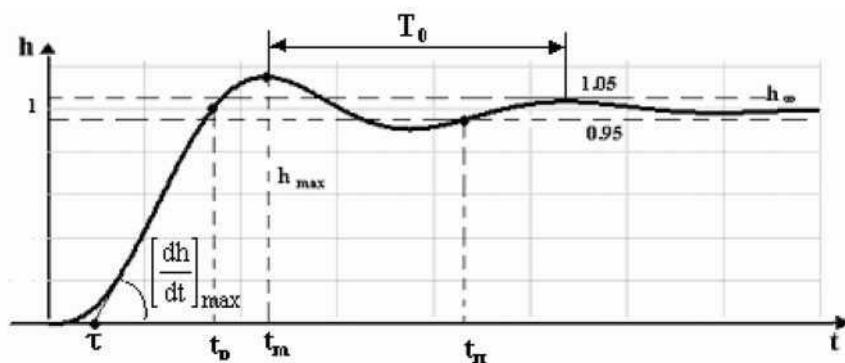


Рис. 6.28. Переходная характеристика  $h(t)$

Для оценки качества работы системы введены следующие показатели:

1. Время переходного процесса или полное время регулирования характеризует быстродействие системы и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее нового установившегося значения становится меньше определенной достаточно малой величины, обычно составляющей  $\pm 5\%$  от  $h_\infty$ .

2. Максимальное отклонение управляемой величины, соответствующее времени  $t_m$ , от установившегося значения:

$$|h(t_m) - h(\infty)| = |h_{\max} - h_\infty| = \Delta_{\text{дин}}$$

, где  $t_m$  - время установления первого максимума управляемой величины, характеризующее скорость изменения ее в переходном процессе.

$\Delta_{\text{дин}}$  представляет собой максимальную динамическую ошибку, определяющую точность системы в переходном процессе.

3. Перерегулирование определяется отношением максимального отклонения от установившейся величины в переходном процессе к установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{|h_{\max} - h_\infty|}{h_\infty} \cdot 100 \%$$

Перерегулирование характеризует склонность системы к колебаниям, то есть близость системы к колебательной границе устойчивости. В конечном итоге характеризует запасы устойчивости. Считается, что запас устойчивости достаточен, если лежит в пределах от 10 до 30%.

4. Время первого достижения регулируемой величиной заданного значения  $t_r$  служит одной из оценок качества регулирования САУ и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда регулируемая величина впервые достигает заданного значения.

5. Колебательность переходного процесса обычно определяется числом колебаний, равным числу минимумов кривой переходного процесса в интервале  $[0, t_n]$  при ликвидации возмущения, или в случае отработки задания - числом перерегулирований за этот же интервал. Это число составляет обычно от 2 до 3.

6. Собственная частота колебаний системы  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  , где  $T_0$  период собственных колебаний системы.
7. Логарифмический декремент затухания системы  $d$ , характеризующий быстроту затухания колебательного процесса,  $d = \ln\left\{\frac{a_i}{a_{i+1}}\right\}$  , где  $a_i$  и  $a_{i+1}$  - две амплитуды рядом расположенных максимумов кривой переходного процесса.
8. Максимальная скорость отработки управляемой величины  $(dh/dt)_{\max} = \text{tg} \nu$ .
9. Запоздывание в начале переходного процесса  $\tau$ .
10. Статическая ошибка регулирования - отклонение регулируемой величины от заданного значения по окончании переходного процесса.
11. Динамическая ошибка регулирования - величина наибольшего отклонения регулируемого параметра от заданного значения (кроме начального отклонения).
12. Динамический коэффициент регулирования  $R_d$   

$$R_d = \frac{Y_1}{Y_0} * 100\%$$

где значения величин  $Y_1$  и  $Y_0$  определяются согласно рис. 6.29.



Рис. 6.29 - К понятию динамического коэффициента регулирования

В системах автоматического управления возможны переходные процессы, характер протекания которых отличен от указанного на рис.6.30. Все многообразие переходных процессов в системах автоматического управления можно разделить на три группы:

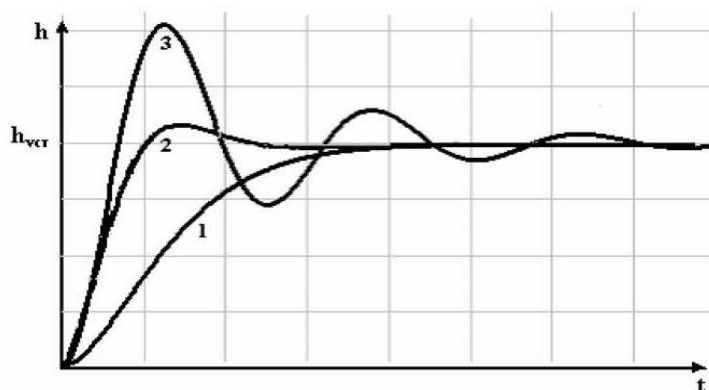


Рис.6.30. Переходные процессы

- монотонный процесс (1), когда скорость изменения управляемой величины (первая производная) не меняет знака в течение всего времени регулирования ( $(dh/dt) > 0$  при  $0 < t < t_n$ );

- аperiodический процесс (2), когда скорость изменения управляемой величины меняет знак не более одного раза за время регулирования.

- колебательный процесс (3), когда скорость изменения управляемой величины меняет знак периодически (более одного раза) за время регулирования.

Качество работы САУ оценивают по величинам статической и динамической ошибок. По этим характеристикам автоматические системы бывают статические и астатические.

В *астатической* системе статическая ошибка равна нулю, т.е. система после процесса регулирования возвращается в исходное состояние равновесия. В *астатических* САУ конечное и исходное равновесие совпадает с заданием (рис.6.31).

В *статической* системе в установившемся состоянии – через достаточно долгое время после начала регулирования, всегда имеется статическая ошибка регулирования (рис.6.31).

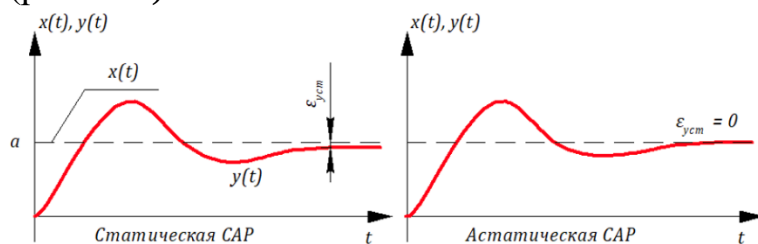


Рис. 6.31. Виды переходного процесса

### Интегральные оценки качества переходного процесса.

Для количественной и качественной оценки качества переходного процесса используют интегральные оценки - наиболее простые и наиболее наглядные оценки качества переходного процесса. С помощью одного числа, вычисленного одинаковым способом для сравниваемых систем, можно сказать, какая система имеет лучшее качество переходного процесса.

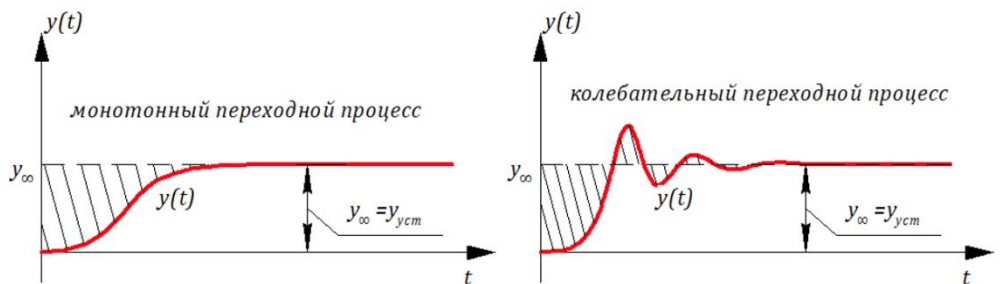


Рис. 6.32. Виды переходного процесса

Введем новую функцию, отклонение от установившегося значения  $\varepsilon(t)$

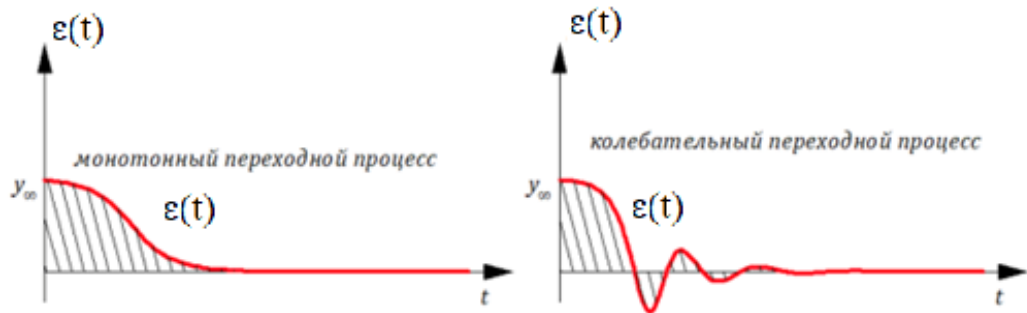


Рис. 6.33. Функция отклонения в разных переходных процессах

Существуют несколько типов интегральных оценок:

Простая:

$$J_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt = \int_0^{\infty} [y_{\infty} - y(t)] dt$$

Данная оценка наиболее справедлива для монотонных переходных процессов чем меньше  $J_1$ , тем САР имеет «лучший» переходный процесс, т.е. динамическая погрешность меньше и время переходного процесса меньше.

Однако для колебательных переходных процессов такая оценка не совсем корректна, т.к. в принципе, для незатухающего колебательного переходного процесса можно получить и нулевую оценку  $J_1$ .

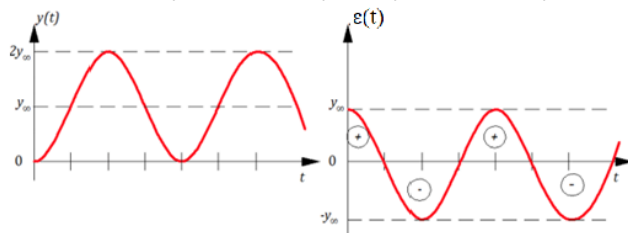


Рис. 6.34. Возможная ошибка простой оценки

Более предпочтительно в этом случае использовать улучшенную простую оценку

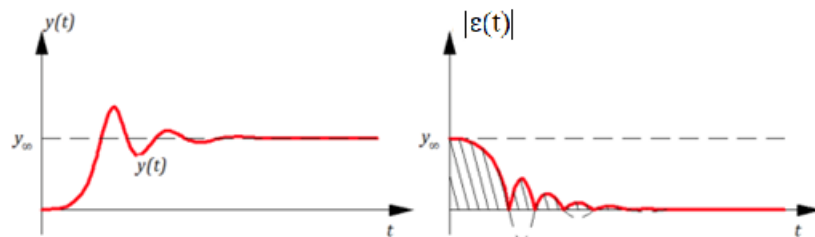


Рисунок 6.35. Простая улучшенная оценка

Более часто для колебательных переходных процессов используют либо квадратичную оценку, либо улучшенную квадратичную оценку. Квадратичная оценка:

$$J_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} [y_{\infty} - y(t)]^2 \cdot dt$$

Естественно, чем меньше динамическая, статическая ошибки и время регулирования, тем меньше величина интеграла  $J$  и выше качество работы САУ.

## 6.7. Синтез и коррекция САР

В ТАУ можно выделить две характерные задачи:

- 1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы — это задача анализа САУ;
- 2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ — это задача синтеза САУ.

Вторая задача сложнее ввиду своей неоднозначности, многое определяется творческими способностями проектировщика. Поэтому обычно задача синтеза САУ ставится ограниченно. Считается, что основная часть системы уже задана, что обычно имеет место. Требуется синтезировать корректирующие звенья, то есть выбрать их схему и параметры. При этом необходимо, чтобы в результате коррекции САУ обеспечивался требуемый запас устойчивости, точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

В тех случаях, когда устойчивость и необходимые качества не могут быть достигнуты путем изменения параметров системы (коэффициентов передачи, постоянных времени), то применяется коррекция. Коррекция представляет собой введение в систему дополнительных элементов, называемых корректирующими. Корректирующие элементы (устройства) могут быть включены в структуру САР различными способами. Корректирующее устройство может быть включено в прямую цепь последовательно (рис.6.36). Последовательные корректирующие устройства обычно применяют в тех случаях, когда сигнал управления представляет собой напряжение постоянного тока. Если корректирующее устройство вводит производную от сигнала рассогласования  $D$ , то происходит увеличение запаса устойчивости и повышение качества переходного процесса. При введении интеграла и производной от сигнала рассогласования обеспечивается астатизм в сочетании с сохранением устойчивости и качества переходной характеристики.

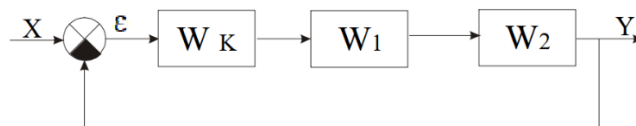


Рис. 6.36. Последовательная коррекция.

Применяется также включение корректирующего устройства в виде обратной связи (рис.6.37).

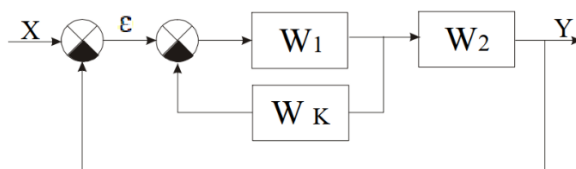


Рис. 6.37. Коррекция в виде обратной связи.

Обычно параметры корректирующего устройства выбирают таким образом, чтобы выполнялось соотношение:

$$|W_1(j\omega) \times W_k(j\omega)| \gg 1$$

В этом случае свойства участка цепи, где включена коррекция и изменены её параметры, не оказывают влияния на свойства всей системы. Это важное свойство является причиной широкого применения коррекции в виде обратной связи. Обратная связь здесь обычно является отрицательной. Применяется третий способ коррекции – параллельный (рис.6.38).

Параллельная коррекция имеет меньшие возможности, чем две предыдущие разновидности. Вместе с тем параллельное корректирующее устройство при меньшей сложности обеспечивает нужное преобразование сигнала рассогласования. Выбор параметров корректирующих устройств производится исходя из критериев устойчивости и проверяется по оценкам качества переходных процессов.

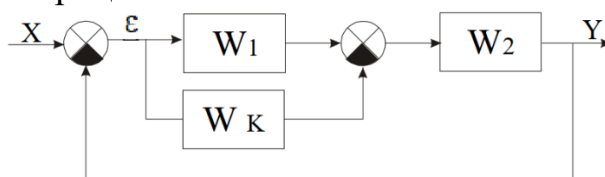


Рис. 6.38. Параллельная коррекция.

## 6.8. Моделирование в автоматике

**Моделирование** – это замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом или другим объектом (моделью) и изучение свойств оригинала путём исследования свойств модели.

В зависимости от способа реализации все модели можно разделить на два больших класса: физические и математические.

**Физические модели** предполагают, как правило, реальное воплощение физических свойств оригинала.

Физическое моделирование называют также макетированием. Физическое моделирование используется тогда, когда исследуемый объект не поддаётся точному математическому описанию или оно чрезмерно сложно, т. е. в тех случаях, когда применение других методов моделирования затруднительно или неэффективно.

Недостатки физического моделирования:

- высокая стоимость моделей сложных объектов;
- сложность варьирования параметров модели – необходимо изготавливать новые модели с заданными параметрами.

**Математическая модель** представляет собой формализованное описание системы с помощью некоторого абстрактного языка, например в виде совокупности математических соотношений или схемы алгоритма.

Относительно САУ, в частности электропривода, практически во всех случаях с достаточной для нужд проектирования точностью динамические режимы работы описываются дифференциальными и разностными уравнениями, линейными или нелинейными. Таким образом, результатами моделирования являются решения соответствующих уравнений.

Технология компьютерного моделирования предполагает выполнение следующих действий:

- 1) определение цели моделирования;
- 2) разработка концептуальной модели;
- 3) формализация модели;
- 4) программная реализация модели;
- 5) планирование модельных экспериментов;
- 6) реализация плана эксперимента;
- 7) анализ результатов моделирования.

Содержание первых двух этапов практически не зависит от математического метода, положенного в основу моделирования. Реализация остальных пяти этапов зависит от подходов к построению модели. Имеются два основных подхода: *аналитическое моделирование* и *имитационное моделирование*.

**Аналитическое моделирование** предполагает использование математической модели реального объекта в форме алгебраических, дифференциальных, интегральных и других уравнений, связывающих выходные переменные с входными, дополненных системой ограничений. При этом предполагается наличие однозначной вычислительной процедуры получения точного решения уравнений.

При **имитационном моделировании** используемая математическая модель воспроизводит логику (алгоритм) функционирования исследуемой системы во времени при различных сочетаниях значений параметров системы и внешней среды.

Выбор того или иного подхода зависит от типа системы.

Классификация систем по типу поведения представлена на рисунке 6.39.

Все системы можно разделить на две группы: *статические* и *динамические*.

*Система называется статической, если множество её состояний содержит один элемент.*

*Если состояний больше одного, и они могут изменяться во времени, система называется динамической.*

Различают два основных типа динамических систем:

- с **дискретными** состояниями (множество состояний конечно);
- с **непрерывным** множеством состояний.

Системы с *дискретными состояниями* характеризуются тем, что в любой момент времени можно однозначно определить, в каком именно состоянии находится система.

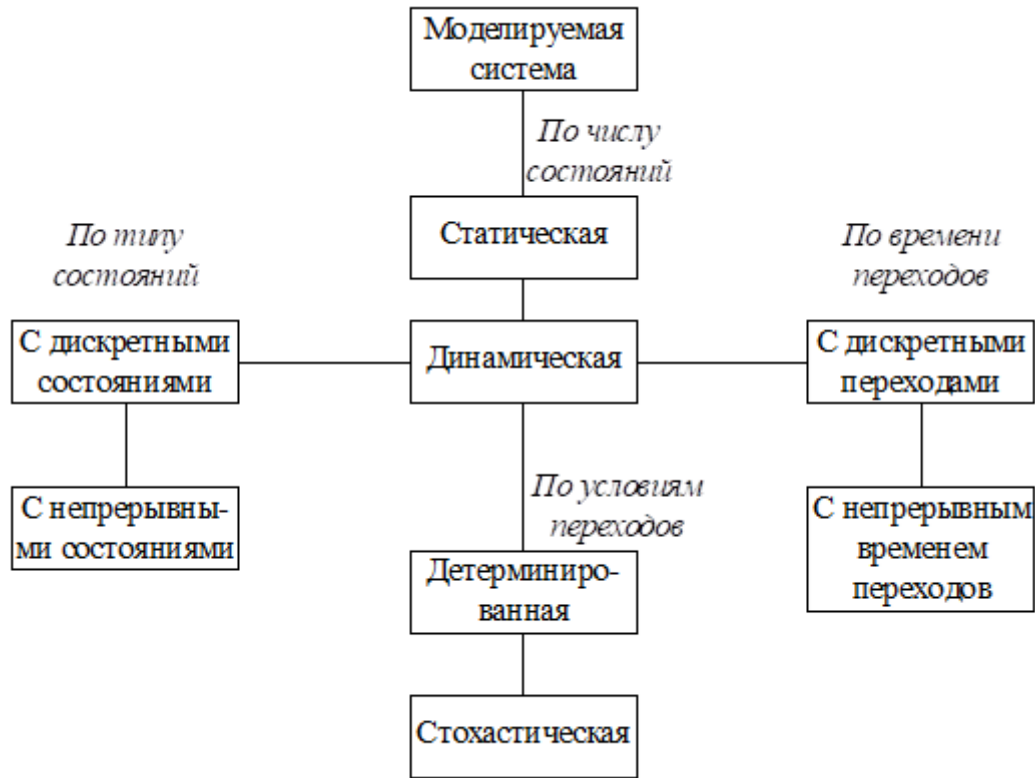


Рис.6.39. Классификация систем по типу поведения

Если состояние системы однозначно определить невозможно, то такая система относится к классу систем с *непрерывным множеством состояний*.

Смена состояний может происходить либо в фиксированные моменты времени, множество которых дискретно, либо непрерывно. В соответствии с этим различают системы с **дискретным временем переходов** (смены состояний) и системы с **непрерывным временем переходов**.

По условиям перехода из одного состояния в другое различают **детерминированные** системы и **стохастические**.

В **детерминированных** системах новое состояние зависит только от времени и текущего состояния системы. Если имеются условия, определяющие переход системы в новое состояние, то для детерминированной системы можно однозначно указать, в какое именно состояние она перейдёт.

Для **стохастической** системы можно указать лишь множество возможных состояний перехода и, в некоторых случаях, - вероятностные характеристики перехода в каждое из этих состояний.

Процесс смены состояний называется **движением системы**.

Системы управления при моделировании относят к **динамическим системам с непрерывным множеством состояний**.

**Программный комплекс MATLAB** поставляется вместе с пакетом расширения Simulink, предназначенным для моделирования динамических систем, модели которых состояются из отдельных блоков (компонентов). Разработка моделей средствами Simulink (в дальнейшем S-моделей) основана на технологии drag-and-drop («перетаски и оставь»). В качестве кирпичиков для построения S-модели используются модули (блоки), хранящиеся в библиотеке Simulink.

Библиотека блоков SIMULINK представляет собой набор визуальных объектов, используя которые можно собирать, как из кубиков, произвольную конструкцию.

Библиотека блоков SIMULINK, входящая в состав системы MATLAB, разбита на разделы:

**Continuous** - раздел непрерывных блоков: Derivative - дифференцирующий блок; Integrator - интегрирующий блок и т.д.

**Math Operations** - раздел математических блоков. В состав раздела математических блоков входят Abs - блок, формирующий на выходе абсолютное значение входного сигнала; Add - блок скалярного, векторного или матричного сложения и т.д.

**Discrete** (*Дискретные системы*), - блоки для моделирования дискретных систем;

**Functions & Tables** (*функции и таблицы*) (в версии 6.5 разделён на два раздела - **Look-Up Tables** и **User-Defined Functions**) – блоки, предназначенные для задания различных зависимостей в виде функций и таблиц;

**Nonlinear** (*Нелинейные элементы*), (в версии 6.5 – **Discontinuities**) - блоки для моделирования нелинейных систем;

**Signal & Systems** (*сигналы и системы*), (в версии 6.5 разделён на два раздела - **Ports & Subsystems**, **Signal Routing**) – блоки для создания подсистем и управления сигналами;

**Sinks** (*Получатели*), - блоки «получатели»;

**Sources** (*Источники*), - блоки «источники».

В новой версии MATLAB имеется ещё три раздела:

**Model Verifications** – блоки для обработки и анализа сигналов;

**Model-Wide Utilities** – блоки, предназначенные для расширения возможностей модели;

**Signal Attributes** - блоки для преобразования сигналов.

Практически каждый блок (рис. 6.40), входящий в библиотеку SIMULINK, имеет, по крайней мере, один параметр настройки. Задавая требуемое значение параметра (или выбирая его из предлагаемого меню), пользователь имеет возможность скорректировать функцию, реализуемую данным блоком.

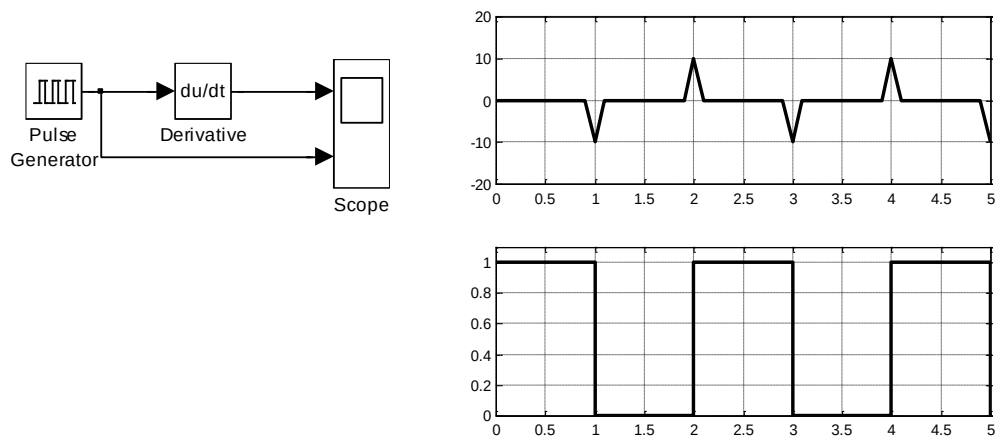


Рис. 6.40. Общий вид модели Simulink

Модель, состоящую из источника единичного ступенчатого воздействия (блок Constant из раздела Sources), апериодического звена (блок Transfer Fcn из раздела Continuous) и виртуального осциллографа (блок Scope из раздела Sinks). Составленная модель представлена на рис. 6.41.

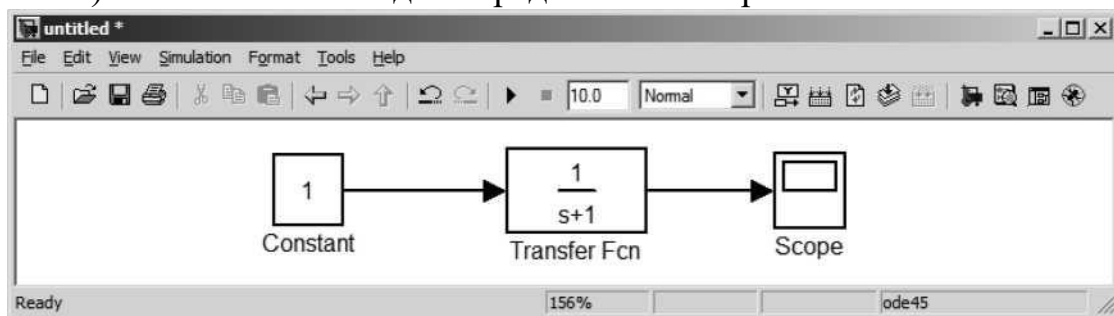


Рис. 6.41. Общий вид модели Simulink

После запуска модели, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов, можно посмотреть результат моделирования в виртуальном осциллографе, открыв его двойным щелчком мыши. На рис. 6.42 представлено окно осциллографа с полученным переходным процессом апериодического звена.

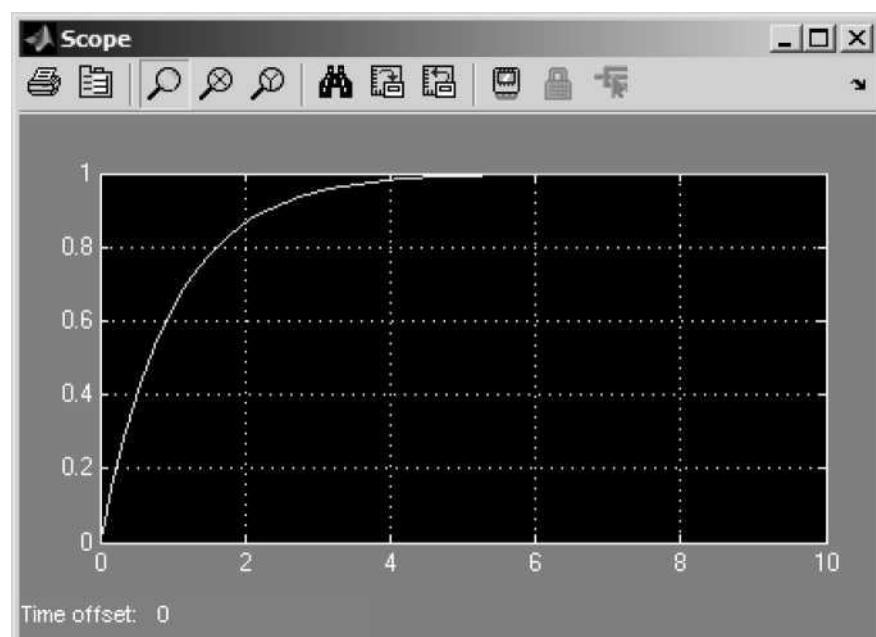


Рис. 6.42. Окно виртуального осциллографа

В окне виртуального осциллографа (рис. 6.42) можно выделить две области: окно осциллографа и панель инструментов, с помощью которой настраивается вид окна, а также внутренние свойства данного блока.

Специально для построения переходных процессов и частотных характеристик линейных систем, а также определения их показателей служит дополнение к пакету Simulink - LTI Viewer.

Для моделирования силовой части электропривода используются блоки из библиотеки SimPowerSystems. Данная библиотека является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и подобного оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них. Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса (полного сопротивления) участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений. Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems (в дальнейшем – SPS-модели) можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем LabVIEW или Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Среда разработки лабораторных виртуальных приборов) представляет собой среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами.

VisSim – программное обеспечение для симуляции систем, которое имеет частотные, корневые, вариационные, нейронные инструменты оценки качества, устойчивости, синтеза, коррекции, оптимизации, линеаризации, отладки объектов в контуре модели и программирования цифровых сигнальных процессоров.

VisSim имеет решатель интерпретирующего типа, функционирующий в динамическом режиме с возможностью online-взаимодействия с оборудованием реального времени. В состав пакета решателя VisSim входят явные решатели – для решения дифференциальных уравнений, неявные – для решения алгебраических уравнений, а также оптимизаторы – для итерационного подбора параметров. Интерпретатор VisSim позволяет автоматически создавать С-код промышленного качества (в том числе с фиксированной точкой для цифровых сигнальных процессоров). Динамические модели систем в VisSim описываются иерархическими структурными схемами (блок-схемами), иначе называемыми направленными сигнальными графами, т. е. VisSim является инструментальной средой визуального проектирования. Возможности управления потоком исполнения модели заключены в свободном выборе величин локальных шагов симуляции (для НЧ-фрагментов модели) и в программировании серии повторных симуляций (либо для оптимизации, либо для изучения поведения модели в условиях случайных возмущений). Для поддающихся линеаризации фрагментов модели VisSim выполняет следующие виды символьного анализа: определение коэффициентов передаточной функции и ABCD-матриц пространства состояний; определение нулей и полюсов передаточных функций; билинейное преобразование (переход от линейных систем к дискретным и обратно). Опираясь на результаты линеаризации модели, VisSim выполняет корневой (годограф корней) и частотный (ЛАЧХ и ЛФЧХ, годограф Найквиста) анализ. Также в VisSim имеются мастера для генерации коэффициентов классических линейных (Бесселя, Баттерворта, Чебышева, инверсного Чебышева) и дискретных (КИХ, БИХ-фильтров, преобразователя Гильберта, дифференциатора) фильтров. Базовая библиотека блоков VisSim (в списке менее 100 позиций) не требует дальнейшего расширения. Пользователю предоставлена возможность определить собственную библиотеку моделей. Расширения пакета (Add-Ons) включают библиотеки с моделями устройств электропривода, систем связи и целочисленной математики (для DSP).

Программа SamSim предназначена для моделирования линейных и нелинейных цепей в системах автоматического управления (САУ) и может быть использована для предварительного моделирования САУ, отработки и исследования численных методов расчета. С помощью этой программы возможно:

- построение любых схем моделей из элементов, предлагаемых библиотеками;
- задание параметров интегрирования и параметров элементов схемы;
- сохранение в файле и считывание из файла модели (схемы и ее параметров);
- построение зависимостей от времени в любых точках схемы;
- построение фазовых портретов для любых схем;
- построение частотных характеристик и годографов для любых линейных схем;
- представление результатов расчета в графической и табличной форме;
- сохранение результатов расчета в текстовом файле, графиков в bmp- и jpg-файле;
- экспорт результатов расчета в MS Excel;
- вывод на печать схемы модели и ее параметров, результатов расчета.

Multisim позволяет строить аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы различной степени сложности. С помощью мыши и клавиатуры исследуемую схему собирают на рабочем поле. Электронная виртуальная лаборатория, созданная на основе программы Multisim, предоставляет возможность наглядно моделировать и анализировать линейные и нелинейные электрические цепи. Параметры компонентов цепи, режима работы, виды и параметры воздействий можно изменять в широком диапазоне значений. Основные задачи анализа схем в общем случае сводятся к тому, чтобы проверить:

- выполняются ли необходимые условия действия;
- сможет ли схема начать функционировать при первом включении электропитания после окончания монтажа и наладки, как поведет себя при перерыве питания и будет ли способна после его восстановления правильно продолжить работу;
- обеспечивается ли возникновение сигнала, обращающего внимание персонала на потерю схемой работоспособности как из-за неисправности технологического оборудования, так и при неполадках в самой схеме;
- правильно ли секционировано питание;
- может ли новая схема работать совместно с остальными электрическими устройствами;
- обеспечивается ли защита от токов короткого замыкания;
- обеспечивается ли защита от перегрузки;
- как поведет себя схема при перегорании предохранителей;
- не повлечет ли за собой заземление (нарушение изоляции относительно земли) опасных последствий;
- нет ли ложных цепей, то есть таких цепей, которые возникают помимо нашей воли;

- обеспечивается ли безопасность обслуживающего персонала;
  - обеспечивается ли безопасность оборудования — защищено ли оно от перегрева, пробоя изоляции, вредного влияния среды и т.п.;
  - нет ли в схеме таких обязательных элементов, неисправность которых не может быть своевременно обнаружена в процессе ее работы. Если такие элементы есть (обычно это защита, сигнализация и блокировки безопасности), то нужно обусловить обязательность периодической проверки их действия;
  - верно ли выбран режим работы оборудования, проводов и кабелей;
  - правильно ли согласованы времена совместно действующих аппаратов.
- В Multisim входит множество средств анализа данных моделирования (рис. 6.43):

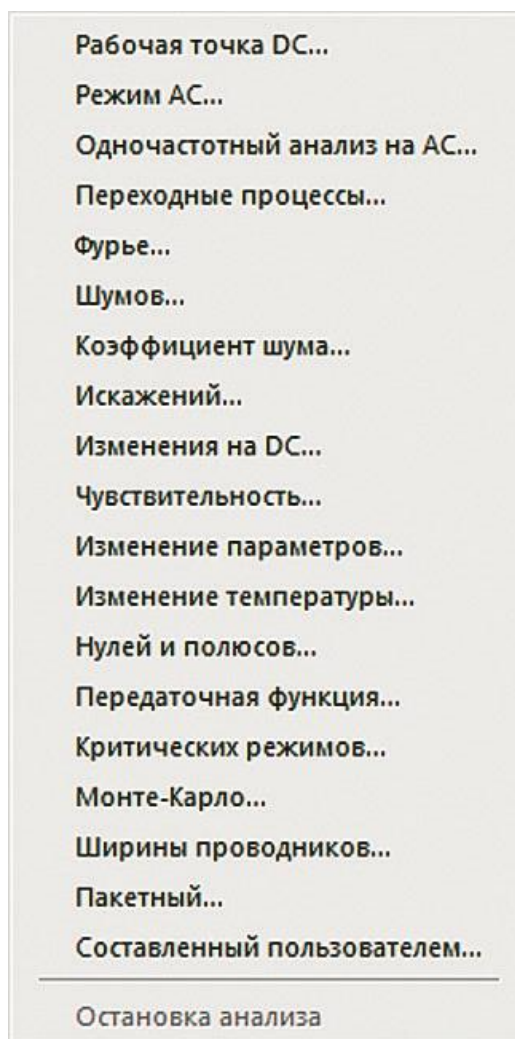


Рис. 6.43 Меню функций анализа программы Multisim

- «Рабочая точка DC» — расчет режима по постоянному току. В этом режиме из моделируемой схемы исключаются все конденсаторы и закорачиваются все катушки индуктивности. Результат анализа обычно дает промежуточные значения для дальнейшего исследования.
- «Режим AC» — расчет амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик.
- «Переходные процессы» — расчет переходных процессов в цепи.

- «Фурье» — проведение спектрального анализа Фурье, то есть анализа сложных периодических сигналов, применимого к любым несинусоидальным периодическим функциям, преобразуемым в синусоидальные или косинусоидальные формы и постоянную составляющую.
- «Шумы» — анализ спектра внутренних шумов, который заключается в создании шумовой модели схемы путем использования шумового вклада каждого резистора и полупроводникового устройства.
- «Искажения» — анализ нелинейных и интермодуляционных искажений. Применяется для анализа искажений сигнала, которые могут быть не очевидны при использовании анализа переходного процесса.
- «Изменения на DC» — вариация параметров используемых в анализируемой схеме источников питания при расчете режима по постоянному току.
- «Чувствительность» — расчет относительной чувствительности характеристик схемы к изменениям параметров выбранного компонента при частотном анализе на переменном токе (AC) или при расчете статического режима на постоянном токе (DC). Анализ чувствительности помогает определить количество компонентов схемы, которые будут влиять на выходной сигнал.
- «Изменение параметров» — многовариантный параметрический анализ электрической схемы. Он позволяет проверять работу схемы, изменяя при симуляции значения параметров компонентов в заданном диапазоне, что исключает необходимость нескольких симуляций схемы с разными параметрами компонентов.
- «Изменение температуры» — температурные испытания схемы. Этот анализ позволяет проверять работу схемы, изменяя при симуляции значения температуры в заданном диапазоне, что исключает потребность в нескольких симуляциях схемы с разными значениями температуры. При этом можно установить начальное и конечное значения температуры, а также ее приращения.
- «Нулей и полюсов» — расчет карты нулей и полюсов передаточной характеристики анализируемой схемы для определения стабильности электрической схемы.
- «Передаточная функция» — расчет передаточной функции DC при малом сигнале между входным источником и двумя выходными узлами (для напряжения) или выходной переменной (для тока) в схеме. Вычисление входного и выходного сопротивления.
- «Критических режимов» — исследование критических комбинаций параметров компонентов, действующих на схему. Multisim выполняет этот анализ в сочетании с DC- или AC-анализом.

- «Монте-Карло» — статистический анализ по методу Монте-Карло, позволяет исследовать влияние изменения свойств компонентов на работу схемы.
- «Ширины проводников» — расчет минимальной ширины трассы, необходимой для поддержания в любом проводнике схемы RMS тока.
- «Пакетный» — возможность собрать в пакет разные анализы для последовательного их выполнения при помощи одной интерпретируемой команды.
- «Составленный пользователем» — позволяет вручную загрузить SPICE card или netlist и ввести SPICE-команды, что расширяет возможности настройки симуляции по отношению к использованию графического интерфейса Multisim. Однако при этом разработчик должен быть знаком с синтаксисом SPICE-команд.

Процесс эмуляции и анализа исследуемой схемы можно представить в виде следующих этапов:

1. Считывание программной эмуляции с окна редактора схем сведений обо всех компонентах схемы, номинальных значениях и соединениях элементов.
2. Проверка правильности сборки схемы и введенных данных о компонентах. После чего данные о компонентах схемы заменяются их математическими моделями SPICE. При этом в случае обнаружения критической ошибки эмуляция прерывается.
3. Автоматическое составление на основании введенных сведений о компонентах схемы и решение численными методами системы линейных, нелинейных или дифференциальных уравнений.
4. Представление результатов эмуляции на индикаторах виртуальных приборов, графических экранах и сохранение в специальной контрольной записи (audit trail), доступной для автономного просмотра.

Для начала анализа необходимо выбрать нужную функцию из основного меню программы Multisim посредством запуска команды «Моделирование»→ «Вид анализа» (рис. 6.43), настроить параметры анализа и выполнить анализ нажатием кнопки «Моделировать».

Основным инструментом просмотра результатов моделирования является плоттер Grapher. Данные отображаются в виде графиков (рис.6.44а) или таблиц (рис. 6.44б). На графике показана одна или несколько зависимостей вдоль вертикальной или горизонтальной оси. В таблице представлены строки и колонки текстовых данных. Окно плоттера разделяется на несколько вкладок, число которых зависит от количества выбранных функций анализа. У каждой закладки имеются две возможные активные зоны, указанные красной стрелкой на левом поле: напротив названия закладки или активного графика (таблицы). Некоторые команды, например копирования/вставки/удаления, влияют только на активную область.

Настройки плоттера позволяют изменять такие параметры, как масштаб, диапазон выводимых значений, стили линий осей и т. д. Предусмотрена возможность экспорта полученных результатов моделирования в форматы NI LabView, MS Excel или MathCad. Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для дальнейшей обработки, что позволяет значительно повысить качественный уровень проведения лабораторных и практических исследований.

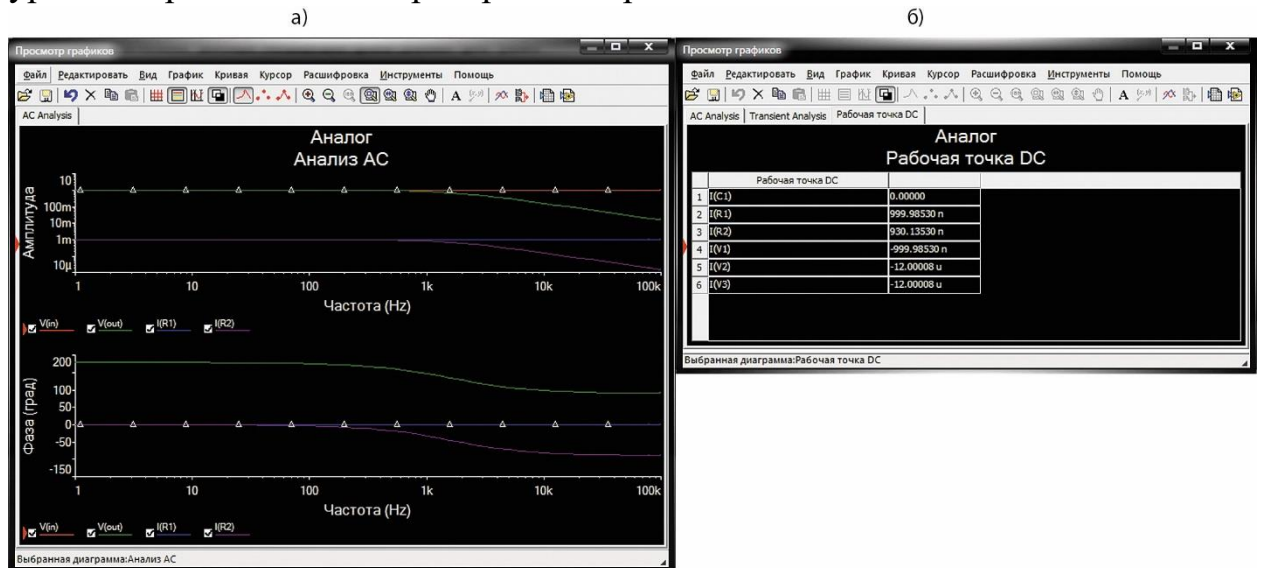


Рис. 6.44. Отображение данных

### Контрольные вопросы к главе 6.

1. Что называется частотными критериями устойчивости САУ?
2. В чем преимущество частотных критериев устойчивости перед алгебраическими?
3. Сформулируйте критерий устойчивости Михайлова.  
Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста.
4. По каким величинам оценивают качество работы САУ?
5. Что такое статическая ошибка?
6. Что такое динамическая ошибка?
7. Дайте определение астатической системы.
8. Дайте определение статической системы.
9. Что такое время регулирования?
10. Что такое перерегулирование?
11. Что такое степень затухания?
12. Что понимают под обобщенным показателем качества работы САУ?
13. Дайте понятие апериодического процесса регулирования.
14. Дайте понятие колебательного процесса регулирования.
15. Как подобрать передаточную функцию корректирующего устройства при компенсации возмущающего воздействия?
16. Какие характерные задачи решаются при проектировании САУ?

17. Что называется синтезом САУ?
18. Как включаются корректирующие устройства?
19. Моделирование в автоматике
20. Классификация систем по типу поведения
21. Программный комплекс MATLAB.
22. Программное обеспечение VisSim.
23. Программа SamSim.
24. Электронная виртуальная лаборатория Multisim.

## Часть 2. Технические средства автоматике

### Глава 7. Элементная база устройств автоматике

Рассмотренные выше регуляторы и другие элементы САУ реализуются специальными устройствами на электронных, электромеханических и иных элементах. В данном разделе рассматривается электронная элементная база устройств автоматике. Современные электронные устройства выполняются в основном на базе полупроводниковых приборов: дискретных элементов - диодов, транзисторов-микросхем, стабилитронов, тиристоров и т.д. и в интегральном исполнении.

#### 7.1. Полупроводниковые диоды

— полупроводниковые электронные приборы с одним p-n-переходом и двумя выводами (от анода А и катода К).

Полупроводниковые диоды различают по следующим признакам:

- по материалу: германиевые; кремниевые и др.;
- по конструкции: плоскостные диоды; точечные диоды; микросплавные диоды;
- по мощности: маломощные; средней мощности; мощные;
- по частоте: низкочастотные; высокочастотные; СВЧ;
- по функциональному назначению: выпрямительные диоды; импульсные диоды; диоды Шоттки; стабилитроны; варикапы; светодиоды и фотодиоды; туннельные диоды и т. д.

Классификация и условные графические обозначения некоторых полупроводниковых диодов приведены на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Классификация и условные графические обозначения диодов

**Выпрямительный полупроводниковый диод** — полупроводниковый элемент, предназначенный для выпрямления переменного тока в постоянный (однополярный пульсирующий).

Выпрямление переменного тока с помощью полупроводникового диода основано на его односторонней электропроводности. Иначе говоря, выпрямительный диод *пропускает ток только в прямом направлении*.

Вольтамперная характеристика и условное графическое изображение выпрямительного диода приведены на рис. 7.2.

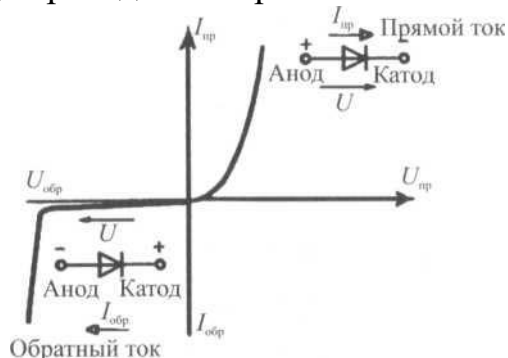


Рис. 7.2. Вольт-амперная характеристика и условное графическое обозначение выпрямительного диода

Основные параметры выпрямительного диода: *прямой максимальный ток диода*  $I_{пр.мах}$ , *падение напряжения на диоде*  $U_{пр}$  при заданном значении прямого тока  $I_{пр}$  ( $U_{пр} \approx 0,4—0,8$  В для германиевых диодов и  $U_{пр} = 0,6—1,2$  В — для кремниевых), *максимально допустимое обратное напряжение*  $U_{обр.мах}$ ,



обратный ток  $I_{обр}$ , обусловленный постоянным обратным напряжением. Конструкционный вид некоторых выпрямительных диодов показан на рис. 7.3.

*Рис. 7.3. Конструкционный вид некоторых выпрямительных диодов*

Для сохранения работоспособности германиевого диода его температура не должна превышать  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кремниевые диоды могут работать при температуре до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для уменьшения разогрева мощных диодов прямым током, принимают специальные меры для их охлаждения: монтаж на радиаторах (рис. 7.4), обдув и т. д.



*Рис. 7.4. Монтаж диода на радиаторах*

Для получения более высокого обратного напряжения диоды с идентичными характеристиками можно включать последовательно. В настоящее время выпускаются так называемые диодные столбы, в которых соединены последовательно от 5 до 50 диодов. Обратное напряжение таких столбов лежит в пределах 2—40 кВ.

Более сложные соединения диодов имеют место в выпрямительных блоках и сборках. В них содержат несколько диодов, электрически независимых или соединенных в виде однофазного или трехфазного моста.

Условно графическое изображение однофазного выпрямительного диодного моста представлено на рис. 7.5.

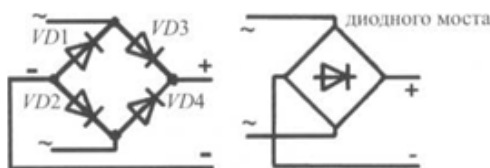


*Рис. 7.6. Условное графическое изображение однофазного выпрямительного диодного моста*

Промышленностью выпускаются готовые выпрямительные мосты, конструкционный вид некоторых из них показан на рис. 7.7.

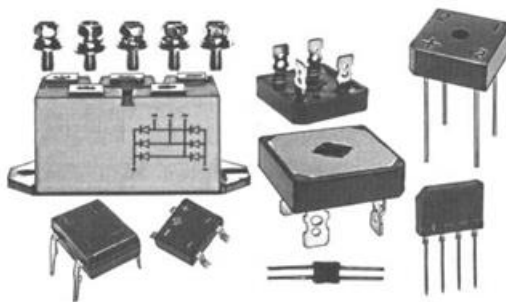


Рис. 7.7. Конструкционный вид выпрямительных диодных мостов

**Универсальный и импульсный диод** отличаются от выпрямительного диода более высоким быстродействием и большими значениями импульсных токов, имеют другую систему параметров. Применяются для работы в импульсных режимах и быстродействующих импульсных устройствах, с малыми длительностями импульсов (микросекунды, доли микросекунд).

**Диод Шоттки** — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении. В то время, как обычные кремниевые диоды имеют прямое падение напряжения около 0,6—1,2 В, применение диодов Шоттки позволяет снизить это значение до 0,2—0,4 В.

Диоды Шоттки используют переход металл-полупроводник в качестве барьера Шоттки (потенциальный барьер в приконтактном слое) вместо р-п-перехода, как у обычных диодов.

На практике большинство диодов Шоттки применяется в низковольтных цепях, поскольку имеют ограничение по обратному напряжению.

Вольт-амперная характеристика и условное графическое изображение диода Шоттки приведены на рис. 7.8.

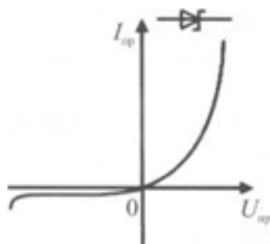


Рис. 7.8. Вольт-амперная характеристика и условное графическое обозначение диода Шоттки

**Полупроводниковый стабилитрон** — полупроводниковый диод, используемый для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке. Представляет собой кремниевый диод, который нормально работает при электрическом пробое р-л-перехода используя участок обратной ветви вольт-амперной характеристики (рис. 7.9). В этом случае при изменении тока, протекающего через стабилитрон, от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ , напряжение на нем почти не изменяется. Если нагрузка  $R_L$  подключена параллельно стабилитрону, напряжение на ней также будет оставаться постоянным в указанных пределах изменения тока, протекающего через стабилитрон.

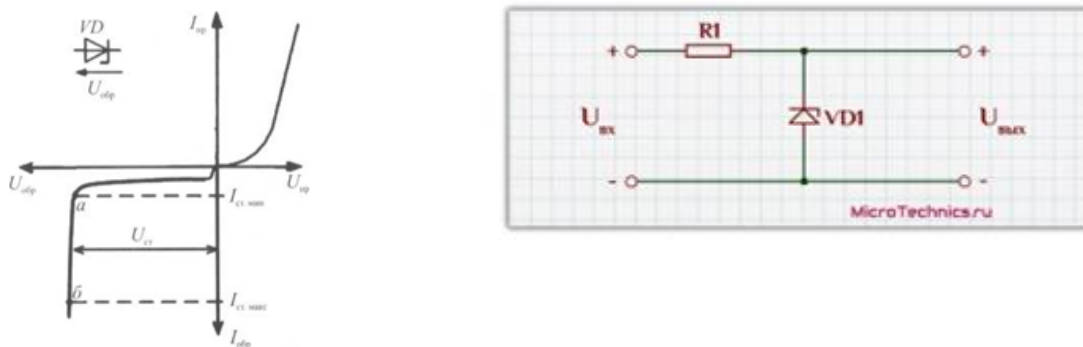


Рис. 7.9. Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилизатора и схема его подключения

Основные параметры стабилизатора: напряжение стабилизации  $U_{ст.ном}$ , минимальный  $I_{ст.мин}$  и максимальный  $I_{ст.макс}$  токи стабилизации, максимальная мощность  $P_{ст.макс}$ . Важным параметром стабилизатора является *температурный коэффициент напряжения*  $TKU$ , который показывает, на сколько процентов изменится напряжение стабилизации при изменении температуры полупроводника на  $1^\circ\text{C}$ . С помощью этих диодов стабилизируют напряжения примерно от 3,5 В и выше. Для стабилизации напряжения порядка 1 В применяют стабилитроны. У стабилитронов используется не обратная, а прямая ветвь вольт-амперной характеристики, поэтому их включают не в обратном, как стабилитроны, а в прямом направлении.

**Туннельный диод** — полупроводниковый элемент, принцип работы которого заключается в туннельном прохождении тока через р-п-переход. При этом ток начинает проходить через переход при напряжении, значительно меньшем контактной разности потенциалов.

Туннельный диод благодаря наличию участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ (рис. 7.10) используется в качестве ключевого тензодатчика (датчика механических напряжений и ускорений).

Основными параметрами туннельного диода являются *ток пика*  $I_{п}$  и *отношение тока пика к току*  $I_{в}$ .

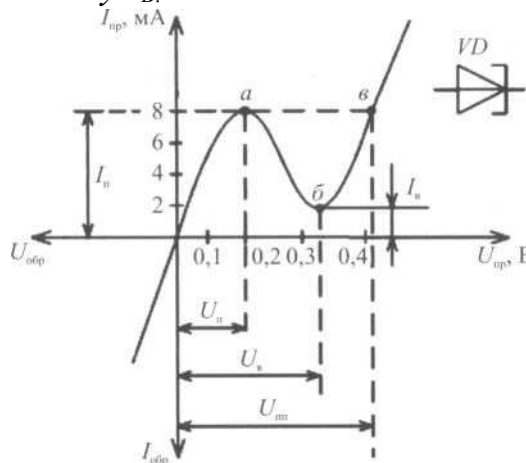


Рис. 7.10. Вольт-амперная характеристика и условное графическое обозначение туннельного диода

Туннельные диоды являются быстродействующими полупроводниковыми приборами и применяются также в генераторах высокочастотных колебаний и импульсных переключателях.

**Обращенный диод** — полупроводниковый диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором электрическая проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

Обращенные диоды (рис. 7.11) представляют собой разновидность туннельных диодов, у которых ток пика  $I_{\Pi} = 0$ . Если к обращенному диоду приложить прямое напряжение  $U_{пр} < 0,3$  В, то ток диода  $I_{пр} \approx 0$ . В то же время даже при небольшом обратном напряжении (порядка десятков милливольт) обратный ток достигает нескольких миллиампер. Таким образом, обращенные диоды обладают вентильными свойствами при малых напряжениях именно в той области, где выпрямительные диоды обычно вентильными свойствами не обладают. При этом направлением наибольшей проводимости является направление, соответствующее обратному току.

Работают обращенные диоды на частотах до 50 ГГц и используются в основном при построении смесителей.

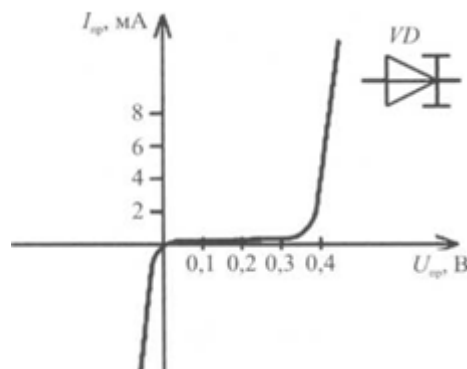


Рис. 7.11. Вольт-амперная характеристика и условное графическое обозначение обращенного диода

**Варикап** — полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости р-п-перехода от обратного постоянного напряжения и который применяется в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. Основной характеристикой варикапа является *вольт-фарадная характеристика*. Вольт-фарадная характеристика и условное графическое изображение варикапа приведены на рис. 7.12.

Основными параметрами варикапа являются *общая номинальная емкость*  $C_{\text{в}}$ , измеренная при заданном обратном напряжении  $U_{\text{обр}}$ , и *коэффициент перекрытия по емкости*  $K_c = \frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}}$ , определяемый как отношение емкостей

варикапа при двух значениях обратного напряжения. Для большинства выпускаемых варикапов  $C = 10 \div 500$  пФ и  $K_c = 5 \div 20$ .

Варикапы применяют в системах дистанционного управления и автоматической подстройки частоты и в параметрических усилителях с малым уровнем собственных шумов.

**Сверхвысокочастотный диод (СВЧ-диод)** — полупроводниковый диод, предназначенный для работы в сантиметровом диапазоне волн. Диод содержит между двумя сильно легированными областями высокой проводимости  $n+$  и  $p+$  активную базовую  $i$ -область с низкой проводимостью и большим временем жизни носителей заряда, т. е.  $p-i-n$ - переход. Это позволяет снизить его емкость и повысить частоту работы элемента.

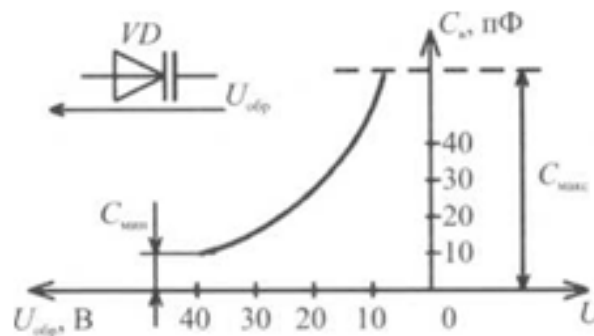


Рис. 7.12. Зависимость емкости от обратного напряжения варикапа и его условное графическое обозначение

Сверхвысокочастотные диоды подразделяют на смесительные, детекторные, параметрические, переключательные и ограничительные, умножительные и настроенные, генераторные.

Применяют СВЧ-диоды в селекторах телевизионных каналов, в высокочастотных детекторах сигналов и другой радиотехнической аппаратуре.

**Магнитодиод** — полупроводниковый диод, в котором используется изменение вольт-амперной характеристики в результате уменьшения подвижности основных и неосновных носителей заряда под действием поперечного магнитного поля.

Если магнитодиод, через который протекает ток, поместить в поперечное магнитное поле, то произойдет увеличение сопротивления базы.

Основным параметром магнитодиода является его *чувствительность*.

Магнитодиоды применяются в качестве чувствительных элементов в функционально ориентированных магнитных датчиках, вентильных электродвигателях, бесконтактных реле предельного тока, регуляторах электрической мощности и т. д.

**Тензодиод** — полупроводниковый диод, в котором используется изменение вольт-амперной характеристики под действием механических деформаций.

В качестве тензодиодов обычно применяют туннельные диоды, у которых отдельные участки вольт-амперной характеристики существенно зависят от деформации рабочего тела диода.

Для структуры тензодиодов существенное значение имеет ориентация плоскости  $p$ - $n$ -перехода.

**Светодиод (светоизлучающий диод)** — полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом или контактом металл-полупроводник, создающий оптическое некогерентное излучение при пропускании через него электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком участке спектра, его цветовые характеристики зависят от химического состава, использованного в светоизлучающем диоде неорганического полупроводника.

При пропускании электрического тока через  $p$ - $n$ -переход в прямом направлении носители заряда — электроны и дырки рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой). Конструкция и условное графическое обозначение маломощного (обычного) и мощного светодиода представлены на рис. 7.13.

**Фотодиод** — полупроводниковый фотоприемник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический ток (заряд) за счет процессов в  $p$ - $n$  переходе.

Обратный ток фотодиода прямо пропорционален освещенности фоточувствительного полупроводникового элемента. Эта характеристика и условное графическое обозначение фотодиода показаны на рис. 7.14 (а).



Рис. 7.13. Конструкция и условное обозначение маломощного и мощного светодиода

При поглощении квантов света в  $p$ - $n$ -переходе или в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые носители заряда (пары электрон-дырка), поэтому обратный ток (фототок) через фотодиод при

освещении возрастает. С увеличением светового потока  $\Phi$  сопротивление перехода уменьшается (рис. 7.14, б).

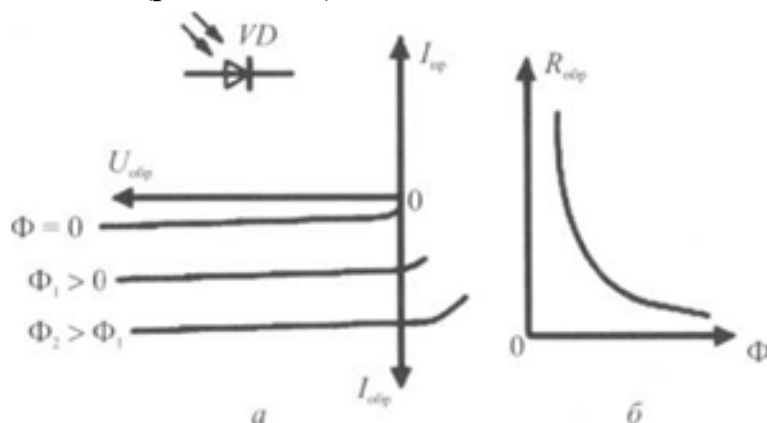


Рис. 7.14. Фотодиод: а — освещенность и условное обозначение; б — зависимость сопротивления от величины светового потока

На рис. 7.15 показан конструкционный вид некоторых разновидностей фотодиодов. Фотодиод может работать в двух режимах:

- 1) *фотогальванический режим* — без внешнего напряжения;
- 2) *фотодиодный режим* — с внешним обратным напряжением.

Фотодиод, работа которого основана на фотогальваническом эффекте, называется *солнечным элементом*.

Кроме фотодиодов существуют фототранзисторы, которые в отличие от фотодиодов еще и усиливают электрический ток (фототок).



Рис. 7.15. Конструкционный вид некоторых разновидностей фотодиодов

## 7.2. Полупроводниковые тиристоры

**Тиристор** — полупроводниковый прибор, выполненный на основе монокристалла полупроводника с тремя или более р-п-переходами и имеющий два устойчивых состояния: *закрытое* (состояние низкой проводимости) и *открытое* (состояние высокой проводимости).

Существует много разновидностей тириستоров (рис. 7.16).



Рис. 7.16. Классификация тиристоров

Тиристор можно рассматривать как электронный выключатель (ключ). Основное применение тиристоров — управление мощной нагрузкой с помощью слабых сигналов, а также переключающие устройства. Существуют различные виды тиристоров, которые подразделяются главным образом по способу управления и по проводимости. Различие по проводимости означает, что бывают тиристоры, проводящие ток в одном направлении (например динистор), и тиристоры, проводящие ток в двух направлениях (например, симисторы — симметричные динисторы).

Основой класса тиристоров, определяющего его параметры и характеристики, является многослойная полупроводниковая структура, состоящая из четырех чередующихся слоев  $p$ - $n$ -типа проводимости ( $p$ - $n$ - $p$ - $n$ ) образующих три электронно-дырочных перехода. Структура тиристора рассчитана так, что взаимодействие между слоями при приложении напряжения различной полярности дает вольт-амперную характеристику с отрицательным участком дифференциального сопротивления.

Переход тиристора из одного состояния в другое в электрической цепи происходит скачком (лавинообразно) и осуществляется внешним воздействием на тиристор: либо напряжением (током), либо светом (для фототиристора). После перехода тиристора в открытое состояние он остается в этом состоянии даже после прекращения управляющего сигнала, если протекающий через тиристор ток превышает некоторую величину, называемую током удержания  $I_{уд}$ .

Перечислим основные типы полупроводниковых тиристоров.

**Динистор (диодный тиристор)** — имеет два вывода (нет управляющего электрода). Включается в проводящее состояние при подаче на анод и катод прямого напряжения, большего «напряжения включения»  $U_{\text{вкл}}$ . Тиристор остается в проводящем состоянии до тех пор, пока ток через него не уменьшить до уровня «тока удержания (выключения)»  $I_{\text{уд}}$  или не снять анодное напряжение.

Структура, условное обозначение и вольт-амперная характеристика динистора показаны на рис. 7.17.

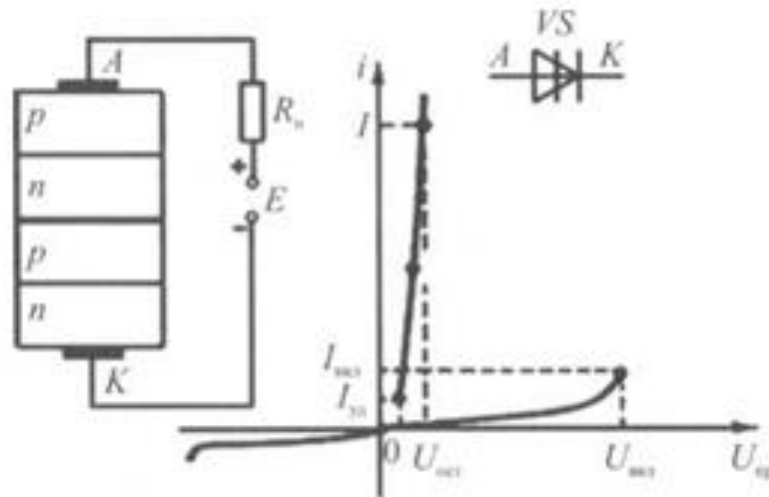


Рис. 7.17. Структура, условное обозначение и вольт-амперная характеристика динистора

**Тринистор (триодный тиристор)** (рис. 7.18) в отличие от динистора имеет третий управляющий электрод. При управляющем токе, равном току включения, тиристор включается и остается во включенном состоянии даже после снятия управляющего тока. Выключить триодный тиристор можно путем уменьшения анодного тока или снятия анодного напряжения.

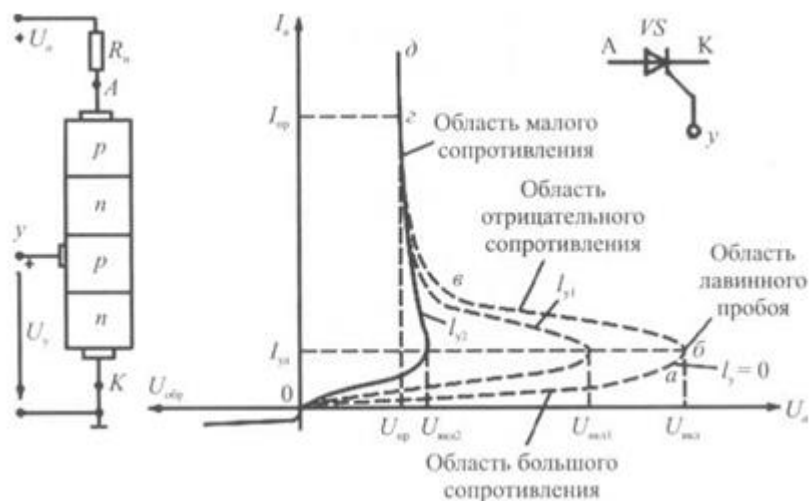


Рис. 7.18. Структура и условное обозначение тринистора, его вольт-амперная характеристика

В отличие от обычного тринистора, который выключается по анодной цепи уменьшением анодного тока до величины, меньшей, чем ток выключения, закрываемые тиристоры выключаются отрицательным током, подаваемым в управляющий электрод.

Конструкция мощного тиристора показана на рис. 7.19. Четырехслойная кристаллическая структура, укрепленная на кристаллодержателе, помещена в металлический корпус, в нижней части которого находится резьбовой вывод катода. К верхнему р-слою крепится плетеный вывод анода. В среднюю р-область вводится вывод управляющего электрода. Выводы анода и управляющего электрода укрепляют в корпусе изолятором.

**Симистор (симметричный тиристор)** — трехэлектродный тиристор с пятислойной структурой. Может включаться при подаче управляющего импульса не только при прямом, но и при обратном напряжении на аноде, т. е. симистор в открытом состоянии проводит ток в обоих направлениях, поэтому такие тиристоры могут работать в цепях управления переменного тока.

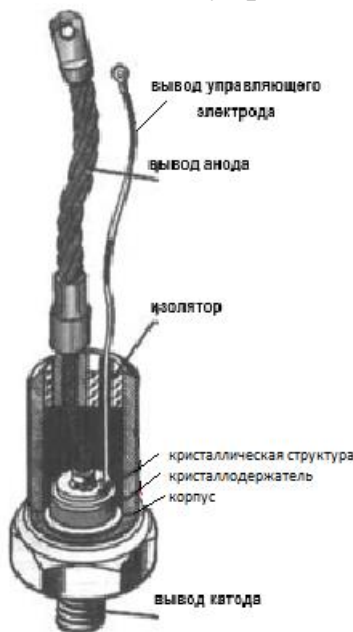


Рис. 7.19. Конструкция мощного тиристора

Условные графические изображения полупроводниковых тиристоров на электрических схемах приведены на рис. 7.20

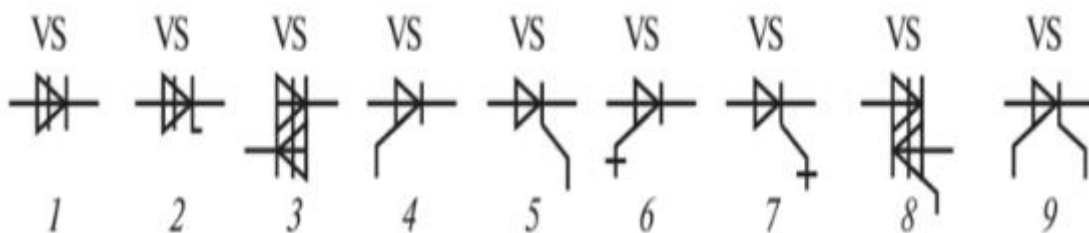


Рис. 7.20. Условные графические обозначения тиристорov на электрических схемах

*I* — диодный, неуправляемый, запираемый в обратном направлении

(динистор); 2 — диодный, управляемый, проводящий (незапираемый) в обратном направлении (динистор) в режиме лавинного пробоя; 3 — диодный симметричный (диак) — симистор; 4 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по аноду; 5 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду; 6 — триодный, управляемый, запираемый с управлением по аноду; 7 — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду; 8 — триодный, симметричный (триак); 9 — триодный, запираемый в обратном направлении

### 7.3. Транзисторы

**Транзисторы** — полупроводниковые приборы с двумя или более *p-n*-переходами, позволяющие усиливать электрические сигналы и имеющие три вывода и более. Их подразделяют на две большие группы: *биполярные и униполярные (полевые)*.

В последнее время широко распространена еще одна группа биполярных транзисторов с изолированным затвором — *IGBT (Insulated — Gate Bipolar Transistor)* — это так называемый гибрид, сочетающий в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления).

Конструкционный вид некоторых полупроводниковых транзисторов показан на рис. 7.21.

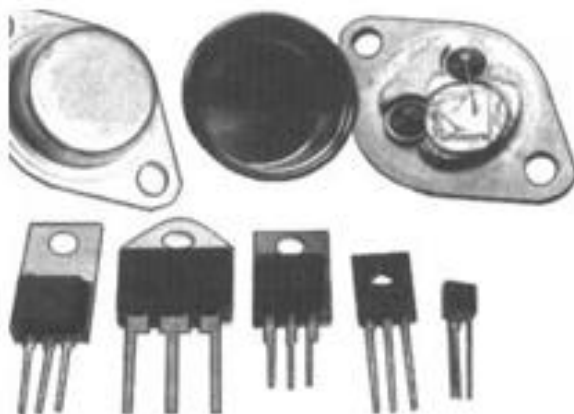


Рис. 7.21 Конструкционный вид некоторых полупроводниковых транзисторов

**Биполярный транзистор** представляет собой полупроводниковый прибор, имеющий два электронно-дырочных перехода, образованных в одном монокристалле полупроводника. Эти переходы образуют в полупроводнике три области с различными типами электропроводности. Одна крайняя область называется *эмиттером (Э)*, другая — *коллектором (К)*, средняя — *базой (Б)*. К каждой области припаивают металлические выводы для включения транзистора в электрическую цепь.

Биполярные транзисторы можно классифицировать:

- по материалу (германиевые и кремниевые);
- по виду проводимости областей (типа  $p-n-p$  и  $n-p-n$ );
- по мощности (малой  $P_{\text{макс}} < 0,3$  Вт, средней  $P_{\text{макс}} \leq 1,5$  Вт и большой  $P_{\text{макс}} > 1,5$  Вт);
- по частоте (низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные и СВЧ).

В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей заряда двух типов: электронов и дырок (или основными и неосновными). Отсюда их название — биполярные.

Электропроводность эмиттера и коллектора противоположна электропроводности базы. В зависимости от порядка чередования  $p$ - и  $n$ - областей различают транзисторы со структурой  $n-p-n$  (рис. 7.22, а) и  $p-n-p$  (рис. 7.22, б). Условные графические обозначения (УГО) транзисторов  $n-p-n$  и  $p-n-p$  отличаются лишь направлением стрелки у электрода, обозначающего эмиттер.

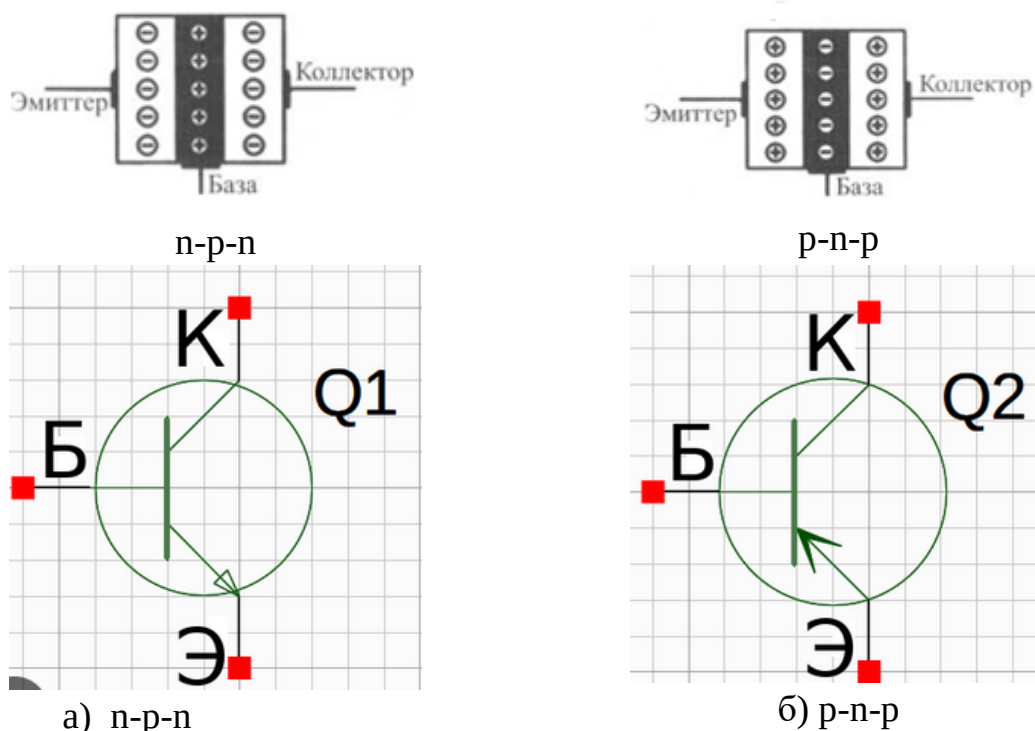


Рис. 7.22. Структуры и условные графические обозначения биполярных транзисторов  $n-p-n$ -типа (а) и  $p-n-p$ -типа (б)

В основу принципа действия транзистора положен эффект влияния базы на прохождение носителей тока (дырок, электронов) из области эмиттера в область коллектора через область базы.

При подключении источника питания (рис. 7.23) переход Э—Б включен в прямом (пропускном) направлении и через него протекает ток. Базовая область в транзисторе имеет малую толщину, поэтому носители тока, попадая в нее, оказываются под воздействием относительно высокого напряжения коллектора. Благодаря этому они приобретают значительную скорость и

преодолевают сопротивление коллекторного перехода. В результате основная часть носителей тока из области Э, пройдя через область Б, переходит в область К и обеспечивает коллекторный ток.

Незначительное увеличение напряжения на переходе Э—Б ведет к увеличению числа носителей тока, поступающих из области эмиттера в области коллектора и базы.

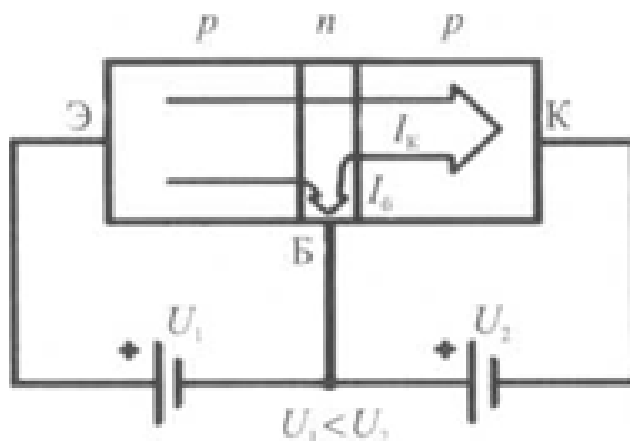
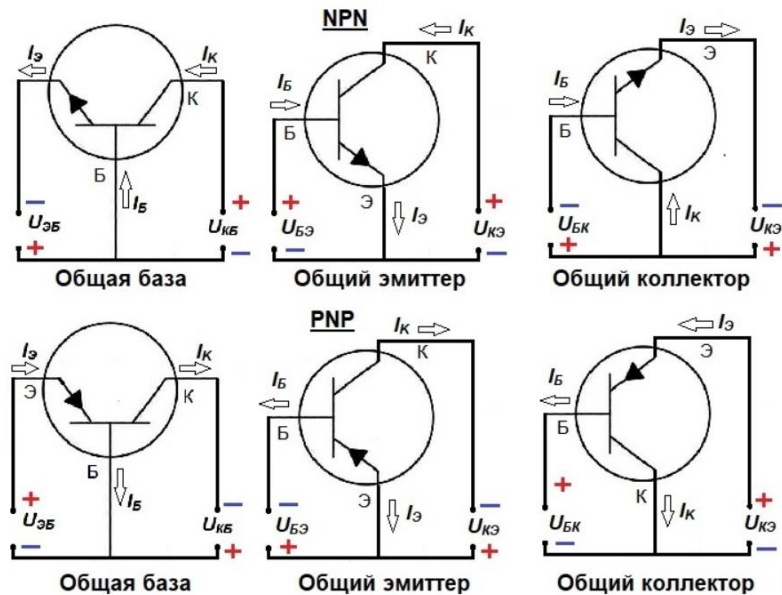


Рис. 7.23. Подключение биполярного транзистора к источнику питания

Для транзистора р-п-р-типа подача небольшого напряжения (до 1 В) на эмиттерный переход («плюс» на эмиттер, «минус» на базу) приводит к открытию этого перехода и движению дырок из эмиттера в базу. Небольшая часть дырок рекомбинирует (поглощается) при встречах с электронами в базе и тем самым создает ток базы ( $I_b$ ). Основная же часть дырок достигает коллекторного перехода и создает ток в цепи коллектора ( $I_c$ ). В итоге транзистор можно рассматривать как устройство, распределяющее ток, протекающий через эмиттер между базой и коллектором.

В электрическую цепь транзистор включают таким образом, чтобы один из его выводов являлся входным, второй — выходным, а третий — общим для входной и выходной цепей. В зависимости оттого, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Эти схемы для транзистора типа *n-p-n* и *p-n-p* приведены в табл. 7.1. При любой схеме включения транзистора (в активном режиме) полярность включения источников питания должна быть выбрана так, чтобы эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном. Входная (или управляющая) цепь служит для управления работой транзистора. В выходной (или управляемой) цепи получают усиленные колебания. Источник усиливаемых колебаний включается во входную цепь, а в выходную включается, а в выходную включается нагрузка.

Таблица 7.1. Схемы включения биполярных транзисторов



В схеме с общей базой ток эмиттера является входным током, ток коллектора — выходным. Выходной ток составляет часть входного:

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_Э,$$

где  $\alpha$  - коэффициент передачи тока для схемы ОБ;

$$\alpha = \Delta I_K / \Delta I_Э$$

Поскольку выходной ток меньше входного, то коэффициент  $\alpha < 1$ . Он показывает, какая часть инжектированных (внедренных) в базу носителей заряда достигает коллектора. Обычно величина  $\alpha$  составляет  $0,92 \div 0,99$ .

В схеме с общим эмиттером выходным током является ток коллектора, а входным — ток базы. Коэффициент усиления по току для схемы с ОЭ:

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_Б, \text{ но}$$

$$\Delta I_Б = \Delta I_Э - \Delta I_K = \Delta I_Э - \alpha \Delta I_Э = \Delta I_Э(1 - \alpha), \text{ тогда}$$

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_Э}{\Delta I_Э(1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Следовательно, коэффициент усиления по току для схемы ОЭ составляет десятки единиц.

Выходной ток транзистора зависит от входного тока, поэтому биполярный транзистор — прибор, управляемый током.

Свойства схем усиления на транзисторах определяются коэффициентами усиления: по току  $K_I$  напряжению  $K_U$ , мощности  $K_P$  и значением сопротивлений входной  $R_{вх}$  и выходной  $R_{вых}$  цепей.

Эти параметры могут быть определены экспериментально и рассчитаны по характеристикам с помощью следующих выражений:

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}; R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}}; K_I = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}; K_U = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}};$$

$$K_P = P_{вых} / P_{вх} = K_I \cdot K_U$$

Основные особенности схем включения транзисторов с ОБ, ОЭ и ОК приведены в табл. 7.2

Таблица 7.2 Особенности схем включения транзисторов

| Наименование параметра          | Схема включения биполярного транзистора                                                    |                                                                                           |                                                                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                 | с общей базой (ОБ)                                                                         | с общим эмиттером (ОЭ)                                                                    | с общим коллектором (ОК)                                                             |
| Входное сопротивление           | $R_{вх} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_э}$<br>малое (единицы — десятки Ом)                | $R_{вх} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б}$<br>среднее (сотни Ом — единицы кОм)           | $R_{вх} = \frac{\Delta U_{кб}}{\Delta I_б}$<br>высокое (десятки — сотни кОм)         |
| Выходное сопротивление          | $R_{вых} = \frac{\Delta U_{кб}}{\Delta I_к}$<br>высокое (сотни кОм — единицы Мом)          | $R_{вых} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_к}$<br>среднее (десятки — сотни кОм)             | $R_{вых} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_э}$<br>малое (сотни Ом — единицы кОм)       |
| Усиление по току                | $K_I = \alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}$<br>$\alpha < 1$<br>( $\alpha = 0,92-0,99$ ) | $K_I = \beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}$<br>Десятки — сотни<br>( $\beta = 10-1000$ ) | $K_I = \gamma = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б}$<br>Десятки — сотни                    |
| Усиление по напряжению          | $K_U = \frac{\Delta U_{кб}}{\Delta U_{бэ}}$<br>несколько сотен                             | $K_U = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta U_{бэ}}$<br>несколько сотен                            | $K_U = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta U_{бк}}$<br>Около единицы<br>( $K_U = 0,9-0,95$ ) |
| Усиление по мощности            | $K_p = K_I K_U = \alpha K_u$<br>несколько сотен                                            | $K_p = K_I K_U = \beta K_U$<br>несколько тысяч                                            | $K_p = K_I K_U = \gamma K_U$<br>несколько десятков                                   |
| Напряжение на входе и на выходе | в фазе (фазовый сдвиг между напряжением на входе и на выходе $0^\circ$ )                   | в противофазе (фазовый сдвиг между напряжением на входе и на выходе $180^\circ$ )         | в фазе (фазовый сдвиг между напряжением на входе и на выходе $0^\circ$ )             |

## Режимы работы биполярных транзисторов

При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения от внешних источников питания. В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении, исходя из этого возможны четыре режима работы транзистора.

При работе в *активном (усилительном) режиме* на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном — обратное.

Если же на обоих переходах напряжение прямое (оба р-п -перехода открыты), то транзистор работает в *режиме насыщения*.

*Режим отсечки*, или запирания, достигается подачей обратного напряжения на оба перехода (оба р-п -перехода закрыты). В электродах транзистора протекают тепловые токи обратно включенных переходов.

Если же на коллекторном переходе напряжение прямое и он инжектирует носители в базу, а на эмиттерном переходе напряжение обратное и он осуществляет экстракцию (извлечение) носителей из базы, то такое включение транзистора называют инверсным, а транзистор работает в *инверсном режиме*. В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором почти отсутствует. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы (усиление, генерирование и т. п.).

**Статическими характеристиками** транзисторов называют графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ:

- 1) входной характеристикой является зависимость:

$$I_3 = f(U_{эб}) \text{ при } U_{кб} = \text{const (рис. 7.24, а).}$$

- 2) выходной характеристикой является зависимость:

$$I_к = f(U_{кб}) \text{ при } I_3 = \text{const (рис. 7.24, б).}$$

Входная характеристика транзистора, включенного по схеме с ОБ при  $U_{кб} = 0$  представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода (как у выпрямительного диода). При  $U_{кб} < 0$  данная характеристика смещается немного выше оси абсцисс, так как при отсутствии входного сигнала через запертый коллекторный переход протекает маленький обратный ток  $I_{к0}$ , который создает на объемном сопротивлении базовой области падение напряжения, приложенное к эмиттерному переходу в прямом направлении. Именно это падение напряжения и обуславливает протекание через эмиттерный переход маленького прямого тока и смещение вверх входной характеристики (рис. 7.24, а).

При  $U_{кб} > 0$  коллекторный переход смещается в прямом направлении, через него протекает прямой ток, а следовательно, падение напряжения на сопротивлении базы изменит полярность на противоположную, что вызовет при отсутствии входного сигнала протекание через эмиттерный переход маленького обратного тока, а следовательно, смещение входной характеристики вниз.

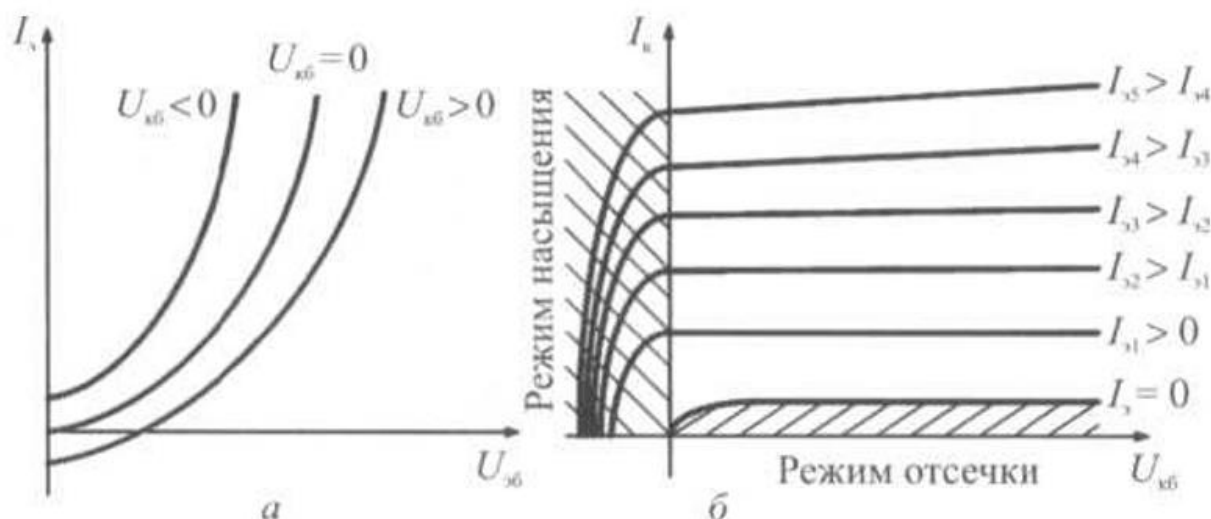


Рис. 7.24. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ

Выходная характеристика биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ при  $I_{\epsilon} = 0$  представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики коллекторного перехода. При  $I_{\epsilon} > 0$  ток в коллекторной цепи будет протекать даже при отсутствии источника коллекторного питания за счет экстракции инжектированных в базу носителей полем коллекторного перехода. При увеличении напряжения  $U_{\kappa\epsilon}$  коллекторный ток практически не меняется, так как количество инжектированных в базу носителей не меняется ( $I_{\epsilon} = \text{const}$ ), а возрастает только скорость их перемещения через коллекторный переход. Чем больше уровень тока  $I_{\epsilon}$ , тем больше и коллекторный ток  $I_{\kappa}$ .

При изменении полярности ( $U_{\kappa\epsilon}$  на противоположную) меняется и включение коллекторного перехода с обратного на прямое, поэтому ток  $I_{\kappa}$  вначале очень быстро снижается до нуля, а затем изменяет свое направление на противоположное.

Зона, расположенная между осью абсцисс и начальной выходной характеристикой, соответствующей  $I_{\epsilon} = 0$ , называется зоной отсечки и характеризуется тем, что оба перехода транзистора — эмиттерный и коллекторный смещены в обратном направлении.

Зона между осью ординат и круто изменяющимся участком выходных характеристик называется зоной насыщения. В этом случае оба перехода транзистора смещены в прямом направлении; ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания.

Промежуточное положение рабочей точки между зоной отсечки и зоной насыщения определяет работу транзистора в режиме усиления, а область, где она находится, называется активной областью.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ:

1) входной характеристикой является зависимость:

$$I_{\epsilon} = f(U_{\epsilon\epsilon}) \text{ при } U_{\kappa\epsilon} = \text{const (рис. 7.25, а).}$$

2) выходной характеристикой является зависимость:

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const (рис. 7.25, б).}$$

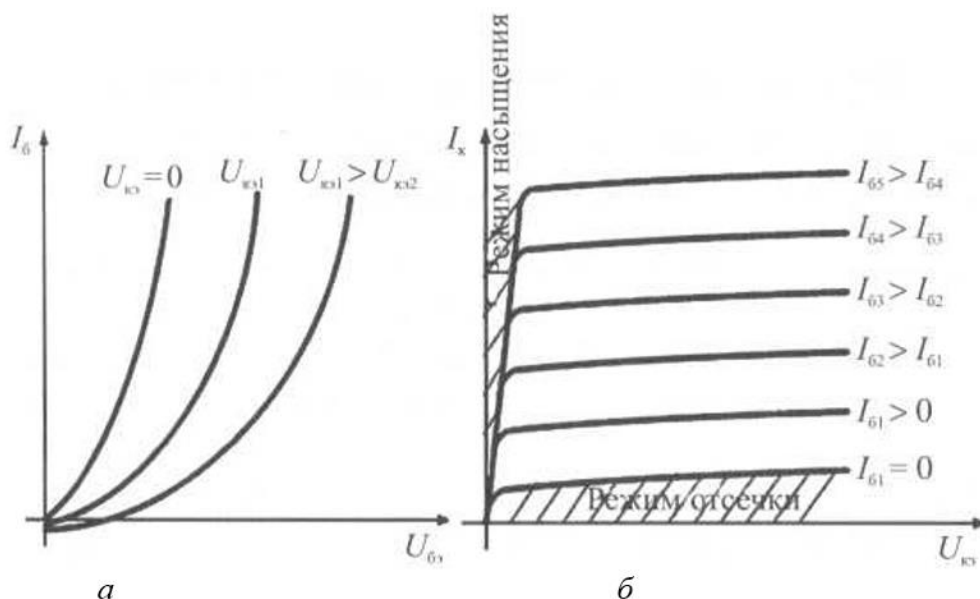


Рис. 7.25. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ

При  $U_{кэ} = 0$  входная характеристика транзистора, включенного по схеме с ОЭ, представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода. При этом коллекторный переход оказывается включенным в прямом направлении на напряжение источника (рис. 7.25, а).

Выходная характеристика транзистора, включенного по схеме с ОЭ при  $I_б = 0$  (рис. 7.25, б), представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики коллекторного перехода. При  $I_б > 0$  характеристики имеют большую крутизну в области малых значений  $U_{кэ}$ . Поскольку коллекторный переход включен в прямом направлении, то сопротивление его незначительно и достаточно небольшого изменения напряжения на нем, чтобы ток  $I_k$  изменился значительно. Более того, при ( $U_{кэ} = 0$  все характеристики, кроме начальной ( $I_б = 0$ ), исходят не из начала координат, а ниже, так как ток коллекторного перехода в этом случае является прямым и имеет направление, противоположное по отношению к обычному току коллектора.

Однако этим маленьким смещением характеристик пренебрегают и в справочниках представлены характеристики, исходящие из начала координат. Статические характеристики транзистора, включенного по схеме с общим коллектором, аналогичны характеристикам транзистора с общим эмиттером.

### Униполярные (полевые) транзисторы

**Полевой транзистор** — полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем. Поскольку в

создании электрического тока участвуют только основные носители заряда, то полевые транзисторы иначе называют *униполярными транзисторами*.

Униполярные, или полевые, транзисторы имеют большое входное сопротивление (свыше 10 МОм).

У полевых транзисторов так же, как и у биполярных, имеются три электрода, называемых истоком, стоком и затвором.

*Истоком* (И) называется электрод, из которого в центральную область полевого транзистора (канал) входят основные носители заряда *n*- или *p*-типов.

*Сток* (С) — электрод, через который основные носители уходят из канала.

*Затвор* (З) — электрод, управляющий потоком носителей заряда (к нему прикладывают управляющее напряжение).

Конструктивно полевые транзисторы оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах, их конструкции практически не отличаются от конструкций биполярных транзисторов.

По физической структуре и механизму работы полевые транзисторы условно делят на две большие группы. Первую образуют транзисторы с управляющим *p-n*-переходом с каналом *n*- (рис. 7.26, а) и *p*-типа (рис. 7.26, б) или переходом металл-полупроводник (барьер Шоттки), вторую — МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзисторы с управлением посредством изолированного электрода (затвора).

Международный термин полевого транзистора с управляющим *p-n*- переходом — *JFET* (junction field-effect transistor).

*Полевой* МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзистор с изолированным затвором состоит из пластины полупроводника (подложки) с относительно высоким удельным сопротивлением, в которой созданы две области с противоположным типом электропроводности. На эти области нанесены металлические электроды — исток и сток. Поверхность полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем диэлектрика (обычно слоем оксида кремния). На слой диэлектрика нанесен металлический электрод — затвор. Получается структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника, поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором часто называют *МДП-транзисторами* или *МОП-транзисторами* (металл-оксид-полупроводник). Международный термин таких транзисторов — *MOSFET* (metal-oxide-semiconductor field effect transistor).

В зависимости от конструкции различают МДП транзисторы с *встроенным n*- или *p*-каналом (рис. 7.26, в, е) и с *индуцированным n*- или *p*-каналом (рис. 7.26, г, ж).

Одной из наиболее частых причин выхода из строя электронных устройств, включающих в себя МОП (МДП)-транзисторы, является превышение допустимого значения напряжения сток-исток. Например, переключение индуктивной нагрузки вызывает перенапряжение, в результате которого

превышается максимально допустимое напряжение МОП-транзистора. Это вызывает лавинный пробой полупроводника и разрушение транзистора. Один из методов защиты мощного МОП (MOSFET)-транзистора состоит в подключении диода между стоком и истоком (рис. 7.26, д, з).

Условные графические изображения полупроводниковых униполярных транзисторов на электрических схемах приведены на рис. 7.26.

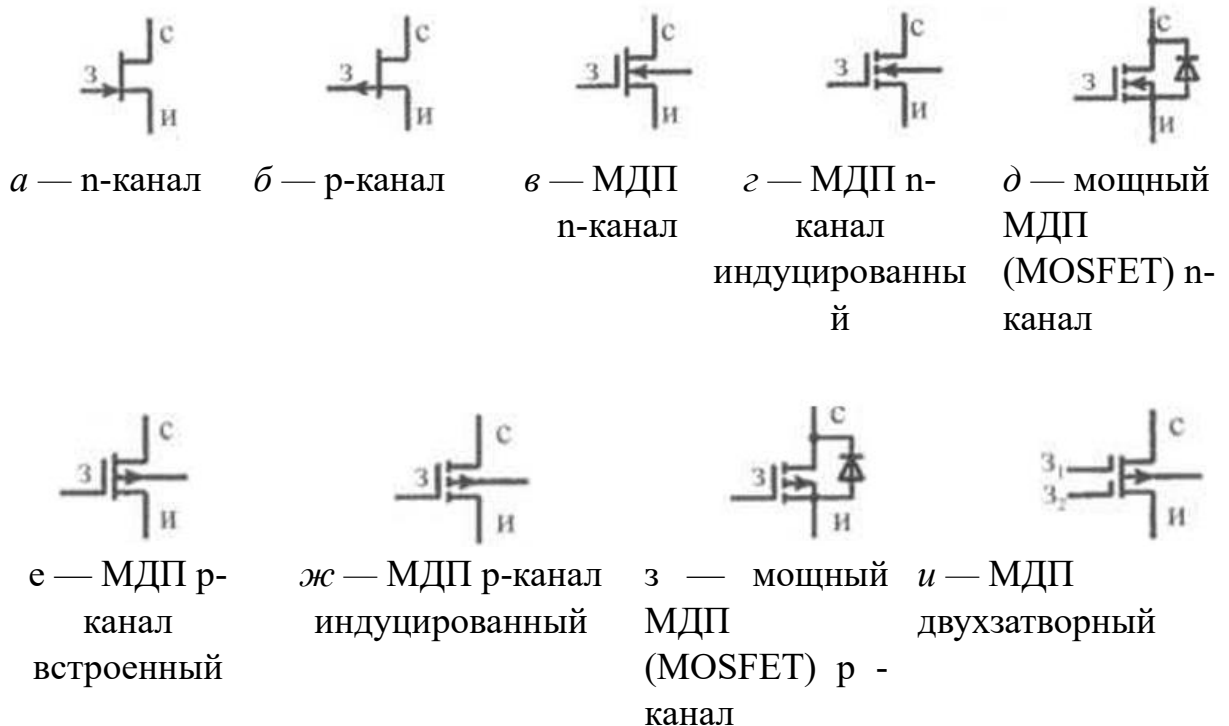


Рис.7.26 Условные графические обозначения униполярных транзисторов на электрических схемах

Основные преимущества МОП (MOSFET)-транзистора:

- MOSFET управляется не током, а напряжением (полем, создаваемым этим напряжением)
- он меньше реагирует на изменения температуры;
- наличие низкого сопротивления канала (до 0,003 Ом);
- наличие широкого диапазона токов (от 0,5 до 100 А);
- наличие высокой частоты переключения (до 500 кГц);
- рабочее напряжение до 1000 В при больших линейных и нагрузочных изменениях, тяжелых рабочих циклах и низких выходных мощностях.

Полевой транзистор можно включать по одной из трех основных схем: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ).

На практике чаще всего применяется схема с ОИ, аналогичная схеме на биполярном транзисторе с ОЭ. Каскад с общим истоком дает очень большое усиление тока и мощности. Схема с ОЗ аналогична схеме с ОБ. Она не дает усиления тока, поэтому усиление мощности в ней во много раз меньше, чем в схеме ОИ. Каскад ОЗ обладает низким входным сопротивлением, в связи с чем он имеет ограниченное практическое применение в усилительной технике.

**Биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT** (от англ. Insulated-Gate Bipolar Transistor) — управляемый силовой электронный полупроводниковый прибор, имеющий трехслойную структуру. Широко применяются для управления электрическими приводами в частотных преобразователях.

IGBT (рис. 7.27) сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления).

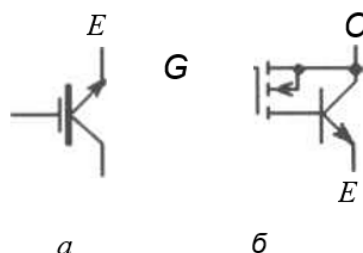


Рис. 7.27. IGBT: а — условное графическое обозначение;  
б — внутренняя схема

IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер (E), коллектор (C), затвор (G). Соединения эмиттера и стока, базы и истока являются внутренними.

Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии.

Выпускаются как отдельные IGBT, так и силовые сборки на их основе в виде модулей в прямоугольных корпусах с односторонним прижимом и охлаждением или в таблеточном исполнении с двухсторонним охлаждением. Модули с односторонним охлаждением выполняются в прочном пластмассовом корпусе с паяными и винтовыми контактами и изолированным основанием (рис. 7.28). Все электрические контакты находятся в верхней части корпуса. Отвод тепла осуществляется через основание.

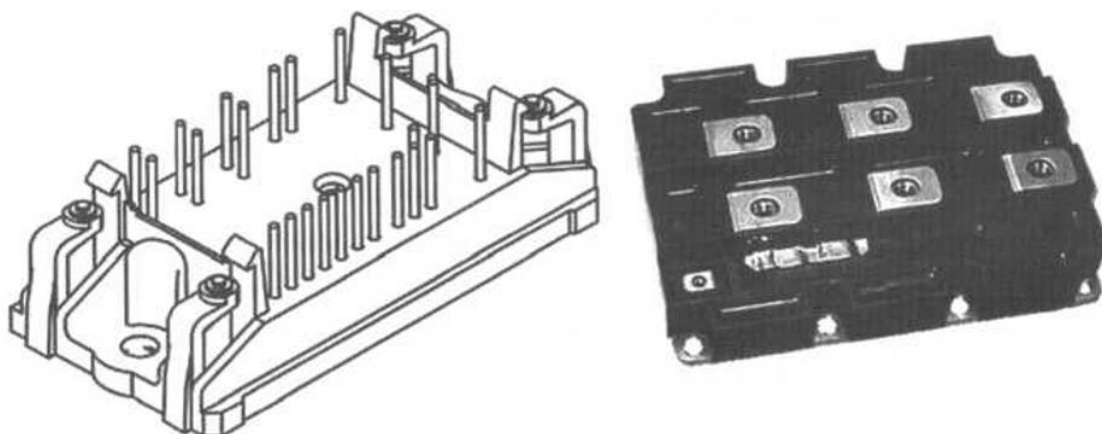


Рис. 7.28. Конструкционный вид IGBT-модулей

IGBT-модуль по внутренней электрической схеме может представлять собой единичный IGBT, двойной модуль, где два IGBT соединены последовательно (полумост), прерыватель, в котором единичный IGBT последовательно соединен с диодом, а также состоять из шести IGBT и включать в себя однофазный или трехфазный диодный выпрямитель. Во всех случаях, модуль содержит параллельно каждому IGBT встроенный обратный диод.

Наиболее распространенные схемы IGBT-модулей приведены на рис. 7.29.

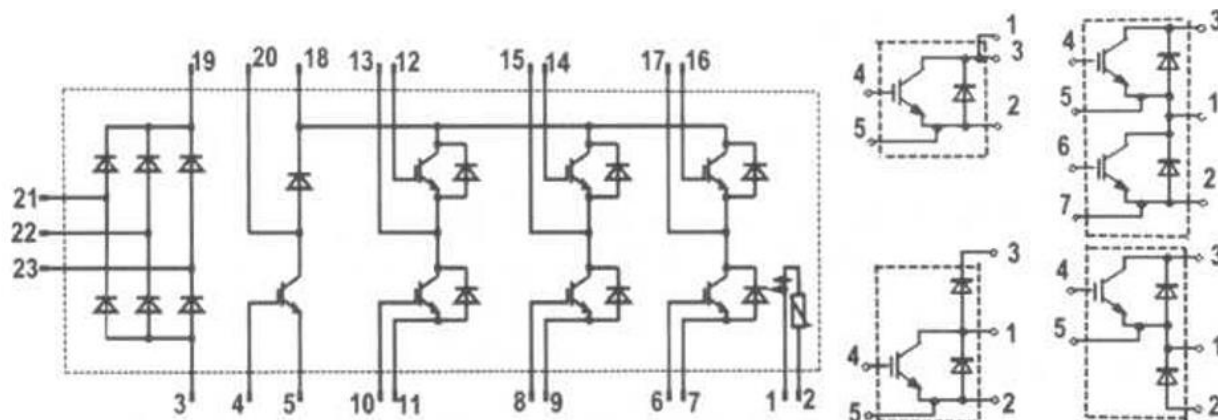


Рис. 7.29. Схемы IGBT-модулей

#### 7.4. Оптоэлектронные приборы

Оптоэлектроника использует оптические и электронные явления в веществах и их взаимные связи для передачи, обработки и хранения информации. Элементной базой оптоэлектроники являются оптоэлектронные приборы — оптроны.

**Оптрон (оптопара)** — электронный прибор, состоящий из излучателя света (обычно — светодиод) и фотоприемника (фотодиод, фототиристор, фототранзистор и т. д.), связанного оптическим каналом в общем корпусе.

Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в свет, его передаче по оптическому каналу и последующему преобразованию обратно в электрический сигнал.

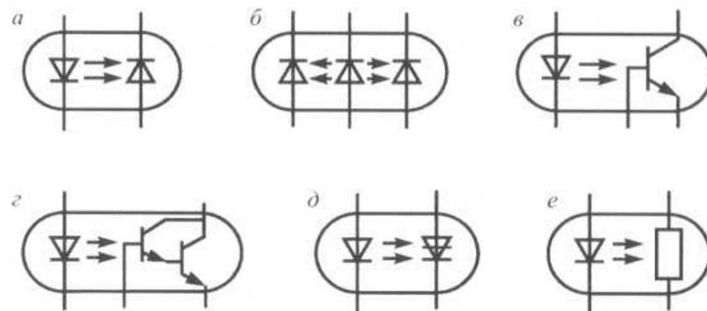
По типу оптического канала оптроны могут быть с *открытым оптическим каналом* и с *закрытым оптическим каналом*.

В оптроне входная и выходная цепи гальванически развязаны между собой. Это свойство оптрона с закрытым оптическим каналом используют для согласования сигналов между электрическими цепями с низким напряжением и высоким.

Оптроны с открытым оптическим каналом доступным для механического воздействия (перекрытия), используются как датчики во всевозможных детекторах наличия (например, детектор бумаги в принтере), датчиках предельных положений, счетчиках и дискретных спидометрах на их базе (например, координатные счетчики в механической мыши, ареометры).

В качестве излучателей в оптронах используют обычно светодиоды на основе арсенида-фосфида галлия GaAsP или алюминий-арсенида галлия GaAlAs, характеризующиеся большой яркостью, высоким быстродействием и длительным сроком службы. Кроме того, они хорошо согласуются по спектральным характеристикам с фотоприемниками на основе кремния.

По *типу фотоприемника* оптроны могут быть: с фотодиодом; с фоторезистором; с биполярным (обычным или составным) фототранзистором; с полевым транзистором, затвором которого управляет фотогальванический генератор; с фототиристором или фотосимистором. Условные графические обозначения некоторых оптронов показаны на рис. 7.30.



. Рис.7.30. Условные графические обозначения оптронов:

а, б — фотодиодного; в — фототранзисторного; г — с составным транзистором; д — фототиристорного (фотодинисторного); е — фоторезисторного

Входными параметрами оптронов являются: номинальный входной ток светодиода в прямом направлении  $I_{вх.ном}$  и падение напряжения на нем в прямом направлении  $U_{пр}$  при номинальном значении входного тока; максимально допустимый входной ток  $I_{вх.макс}$ ; максимально допустимое обратное напряжение на входе  $U_{обр.макс}$ .

Выходными параметрами оптронов являются максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр.макс}$ , прикладываемое к выходу; максимально допустимый выходной ток  $I_{вых.макс}$ ; световое  $R_{св}$  и темновое  $R_{т}$  выходные сопротивления (для фоторезисторных оптронов).

Из передаточных параметров исходным является коэффициент передачи тока  $K_I = \left(\frac{I_{вых}}{I_{вх}}\right) 100$ , выраженный в процентах.

Приведем краткое описание некоторых типов наиболее распространенных промышленных оптронов.

**Фотодиодный оптрон.** Устройство, условное графическое обозначение и внешний вид диодного оптрона показан на рис. 7.31.

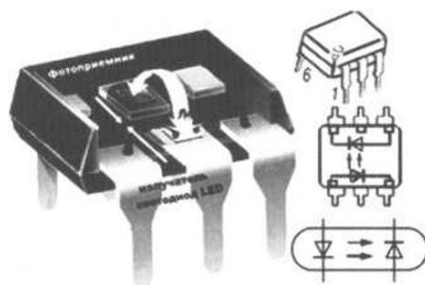


Рис. 7.31. Устройство и условное обозначение фотодиодного оптрона

В качестве излучателя используется светодиод на основе арсенида галлия. В качестве фотоприемников в диодных оптронах используются кремниевые фотодиоды, которые хорошо согласуются по спектральным характеристикам и быстродействию с арсенид-галлиевыми светодиодами.

Коэффициент передачи тока диодного оптрона мал ( $K = 1,0—1,5 \%$ ), однако диодные оптроны являются самыми быстродействующими.

**Фототранзисторный оптрон.** По сравнению с фотодиодным оптроном в качестве фотоприемника в нем используется кремниевый фототранзистор. Являясь усилителем базового тока, фототранзистор имеет существенно более высокую чувствительность, чем фотодиод, поэтому коэффициент передачи тока фототранзисторного оптрона  $K = 50—100 \%$ , а оптрона с составным фототранзистором — до  $800 \%$  и более.

Недостатком фототранзисторов является то, что они по сравнению с фотодиодами гораздо более инерционны и имеют быстродействие  $10^{-4}—10^{-5}$  с.

**Фоторезисторный оптрон.** В качестве фотоприемника в оптронах иногда используют фоторезисторы на основе селенида или сульфида кадмия ( $\text{CdSe}$ ,  $\text{CdS}$ ), а в качестве излучателя — спектрально согласующиеся с ними светодиоды на основе фосфида или арсенида-фосфида галлия ( $\text{GaP}$ ,  $\text{GaAsP}$ ). Быстродействие фоторезисторных оптронов целиком определяется быстродействием фотоприемника, которое составляет  $100—200$  мкс.

**Фототиристорный оптрон.** Включает в себя фототиристор в качестве фотоприемника. Быстродействие фототиристорного оптрона определяется временем выключения фототиристора, в течение которого прибор переходит из открытого состояния в закрытое. Оно составляет десятки микросекунд.

В зависимости от типа фотоприемника оптроны могут применяться в электронных устройствах для переключения, преобразования, согласования, модуляции и т. д. Могут использоваться также в качестве малогабаритных реле для коммутации напряжений и токов, в автогенераторах, цепях обратной связи и т. д.

В последнее время при изготовлении оптоэлектронных устройств оказывается возможным удалять источник и приемник излучения из зоны измерения (от объекта контроля) на десятки метров с помощью элементов волоконной оптики — *волоконных световодов* (жгутов из нитей стекловолокна).

## Вопросы к главе 7

1. Назовите типы и назначение полупроводниковых диодов
2. Назовите типы, назначение и характеристики полупроводниковых тиристоров.
3. Назовите типы и характеристики транзисторов.
4. Что собой представляют биполярные транзисторы?
5. Назовите режимы работы транзисторов.
6. Назовите особенности униполярных (полевых) транзисторов
7. Где применяется биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT?
8. Оптоэлектронные приборы. Состав. Характеристики. Назначение.

## Глава 8. Аналоговые и аналогово-цифровые схемы устройств автоматики

### 8.1. Операционные усилители

**Интегральные микросхемы (ИМС)** — изделия, выполняющие определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов, которые могут рассматриваться как единое целое, выполнены в едином технологическом процессе и заключены в герметизированный корпус.

Кодовое обозначение каждой микросхемы наносится на ее корпус. На корпусе ИМС имеется также ключ или специальная метка (рис. 8.1), относительно которой производится нумерация выводов (обход против часовой стрелки относительно ключа).

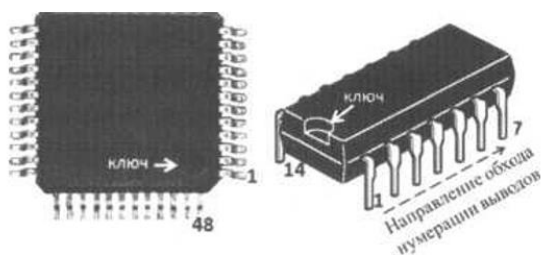


Рис.8.1. Обозначение ключа первого вывода ИМС

Наибольшее распространение получили полупроводниковые микросхемы. *Полупроводниковая ИМС* — полупроводниковый кристалл (в основном подложка кремния), в толще которого выполняются все компоненты схемы. (транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы). Масса и габариты полупроводниковых ИМС очень малы на одном кристалле кремния (размером несколько квадратных сантиметров) могут располагаться десятки и сотни тысяч отдельных элементов схемы.

Кристалл полупроводниковой ИМС с разваренными выводами показан на рис. 8.2.

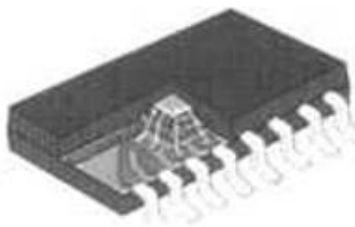


*Рис.8.2. Кристалл полупроводниковой ИМС с разваренными выводами*

Основными параметрами интегральных микросхем является *плотность и степень интеграции*. Плотность упаковки характеризует количество элементов в единице объема ИМС, степень интеграции — количество элементов, входящих в состав ИМС.

По назначению все ИМС подразделяются на три основных класса: аналоговые, цифровые и аналогово-цифровые.

*Аналоговые ИМС* предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам непрерывной функции (усилители, генераторы линейно изменяющихся сигналов, стабилизаторы напряжения, преобразователи сигналов и т. д.).

*Цифровые ИМС* предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам дискретной функции (логические элементы, генераторы импульсного напряжения, микропроцессоры ит. д.).

*Аналогово-цифровые ИМС* предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам непрерывной и дискретной функции (цифро-аналоговые и аналогово-цифровые преобразователи, модуляторы и демодуляторы, коммутаторы и т. д.).

Наиболее распространенной аналоговой ИМС является операционный усилитель (ОУ), в котором сосредоточены основные достоинства усилительных схем.

**Операционным усилителем (ОУ)** называют усилитель, предназначенный для выполнения различного рода операций над аналоговыми сигналами при работе в схемах с отрицательной и в генераторных схемах с положительной обратной связью.

Операционные усилители обладают большим и стабильным коэффициентом усиления напряжения, имеют дифференциальный вход с высоким входным сопротивлением и несимметричный выход с низким выходным сопротивлением, малым дрейфом нуля.

Условные обозначения операционных усилителей приведены на рис. 8.3. Один из входов, обозначенный знаком «+» называют неинвертирующим (прямым), так как сигнал на выходе и сигнал на этом входе имеют одинаковую полярность. Второй вход, обозначенный знаком «—» (его также обозначают знаком инверсии «о»), называют инвертирующим (инверсным), так как сигнал на выходе по отношению к сигналу на этом входе имеет противоположную полярность.

Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя (как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами) следует использовать двухполярное питающее напряжение, которое подключается к соответствующим внешним выводам ОУ. Выводы питания на схемах ОУ могут не указываться.

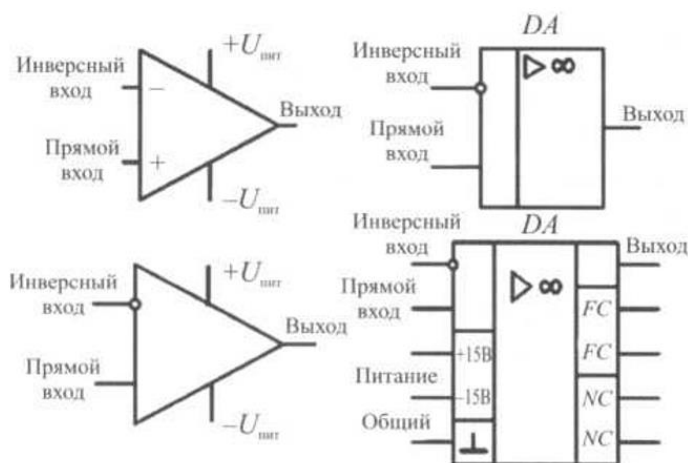
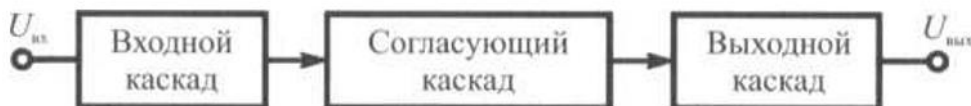


Рис.8.3. Условные обозначения операционных усилителей на схемах электрических принципиальных

Реализация требований, предъявляемых к электрическим параметрам ОУ, невозможна на основе схемы однокаскадного усилителя, поэтому реальные ОУ строятся на основе двух- или многокаскадных схем.

Функциональная схема трехкаскадного ОУ приведена на рис. 8.4. Она включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усиления.



8.4. Функциональная схема трехкаскадного операционного усилителя

В качестве входного каскада ОУ в основном используется дифференциальный усилительный каскад, что позволяет максимально уменьшить величину дрейфа усилителя и получить достаточно высокое усиление.

Согласующий каскад служит для согласования входного сигнала дифференциального усилителя с выходным каскадом ОУ, обеспечивая необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование фаз сигналов.

Выходной каскад, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

Наконец, очень важное обстоятельство: операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой отрицательной обратной связью, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ. Принцип введения отрицательной обратной связи иллюстрируется на рис. 8.5. Часть выходного напряжения возвращается через цепь обратной связи к входу усилителя. Если напряжение обратной связи

находится в противофазе с входным напряжением и взаимно вычитается, то обратная связь называется отрицательной (ООС).



Рис. 8.5. Принцип отрицательной обратной связи

Для анализа схемы, представленной на рис. 8.5, допустим, что входное напряжение изменилось от нуля до некоторого положительного значения  $U_{вх}$ . В первый момент выходное напряжение  $U_{вых}$ , а следовательно, и напряжение обратной связи  $\beta U_{вых}$  также равны нулю. При этом напряжение, приложенное к входу операционного усилителя, составит  $U_д = U_{вх}$ . Так как это напряжение усиливается усилителем с большим коэффициентом усиления  $K_U$ , то величина  $U_{вых}$  быстро возрастет до некоторого положительного значения и вместе с ней возрастет также величина  $\beta U_{вых}$ . Это приведет к уменьшению напряжения  $U_д$ , приложенного к входу усилителя. Тот факт, что выходное напряжение воздействует на входное напряжение так, что это влияние направлено в сторону, противоположную изменениям входной величины, и есть проявление отрицательной обратной связи. Коэффициент усиления ОУ с обратной связью определяется почти исключительно только обратной связью и мало зависит от параметров самого усилителя. В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи. Если в качестве цепи обратной связи применяется RC-цепь, то образуется активный фильтр. Наконец, включение в цепь обратной связи ОУ диодов и транзисторов позволяет реализовать нелинейные преобразования сигналов с высокой точностью.

Если напряжение обратной связи совпадает по фазе с входным напряжением и суммируется с ним, то обратная связь называется положительной (ПОС).

В зависимости от присоединения обратной связи (ОС) к входу усилителя различают: обратную связь последовательную по напряжению (рис. 8.6, а), параллельную по напряжению (рис. 8.6, б), последовательную по току (рис. 8.6, в), параллельную по току (рис. 8.6, г)

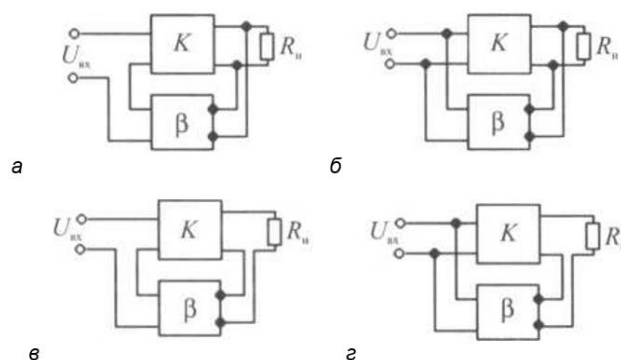


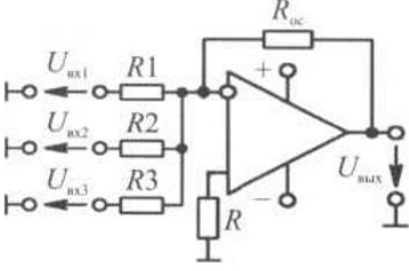
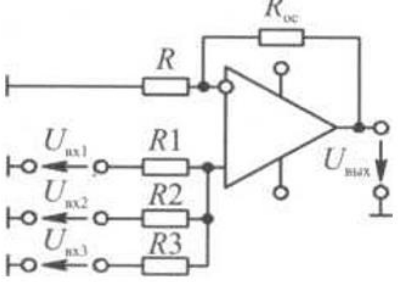
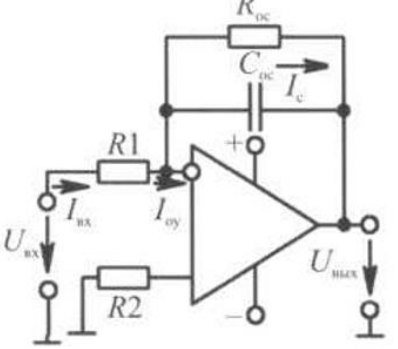
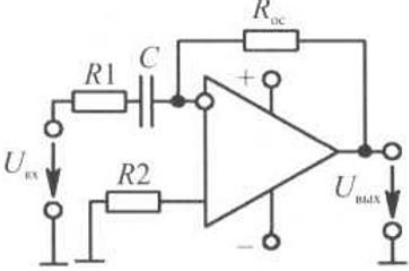
Рис.8.6. Типы обратных связей

### Примеры построения схем на операционных усилителях

Вид выполняемых операционными усилителями операций определяется внешними по отношению к нему элементами. От параметров операционного усилителя зависит только точность выполняемых операций. Наиболее распространенные схемы на основе операционного усилителя приведены в табл. 8.1

Таблица 8.3. Основные электрические схемы на операционных усилителях

| Тип схемы и ее функциональное назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Электрические схемы на операционных усилителях |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <p><i>Инвертирующий усилитель</i> — усиливает входной сигнал и изменяет знак выходного сигнала относительно входного.</p> $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$ $U_{\text{ВЫХ}} = - U_{\text{ВХ}} \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$                                                             |                                                |
| <p><i>Неинвертирующий усилитель</i> — усиливает входной сигнал и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного</p> $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$ $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( 1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} \right)$                                    |                                                |
| <p><i>Вычитатель</i> — усилитель (дифференциальный усилитель), предназначенный для получения разности двух напряжений.</p> $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ2}} \frac{(R_{\text{OC}} + R_1)R}{(R + R_2)R_1} - U_{\text{ВХ1}} \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$ <p>Если <math>R_1 = R_2</math> и <math>R_{\text{OC}} = R</math>, то</p> |                                                |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}) \frac{R_{\text{OC}}}{R_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                      |
| <p><i>Инвертирующий сумматор</i> — суммирует (с весом) несколько напряжений и изменяет знак выходного сигнала относительно входного</p> $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ1}} \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} - U_{\text{ВХ2}} \frac{R_{\text{OC}}}{R_2} - U_{\text{ВХ3}} \frac{R_{\text{OC}}}{R_3}$ <p>при <math>R_1 = R_2 = R_3</math></p> $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{OC}}}{R_1} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}})$ |    |
| <p><i>Неинвертирующий сумматор</i> суммирует (с весом) несколько напряжений и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного</p> <p>при <math>R_1 = R_2 = R_3</math>;</p> $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1+R_{\text{OC}}/R}{n} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}})$                                                                                                                                              |    |
| <p><i>Интегратор</i> — интегрирует (инвертированный) входной сигнал по времени.</p> $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{OC}}} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$ <p>где <math>\tau = R_1 C_{\text{OC}}</math> <math>K_U = -\frac{R_{\text{OC}}}{R_1}</math></p>                                                                                                                            |  |
| <p><i>Дифференциатор</i> — дифференцирует (инвертированный) входной сигнал по времени.</p> $U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}} C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} = -\tau \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$ <p>где <math>\tau = R_{\text{OC}} C</math></p>                                                                                                                                                                                           |  |

## 8.2. Компараторы.

Компараторы — это устройства сравнения, сопоставления сигналов для определенного момента времени (рис.8.7). При каждом равенстве нулю разности двух входных сигналов выходное напряжение изменяется от нижнего (логический 0) до верхнего (логическая 1) предельного значения. Компараторы могут быть аналоговые и цифровые.

В аналоговых компараторах на входе сравниваются два аналоговых сигнала, а на выходе - логический сигнал. В цифровых компараторах и на входе, и на

выходе присутствуют сигналы в цифровом виде.

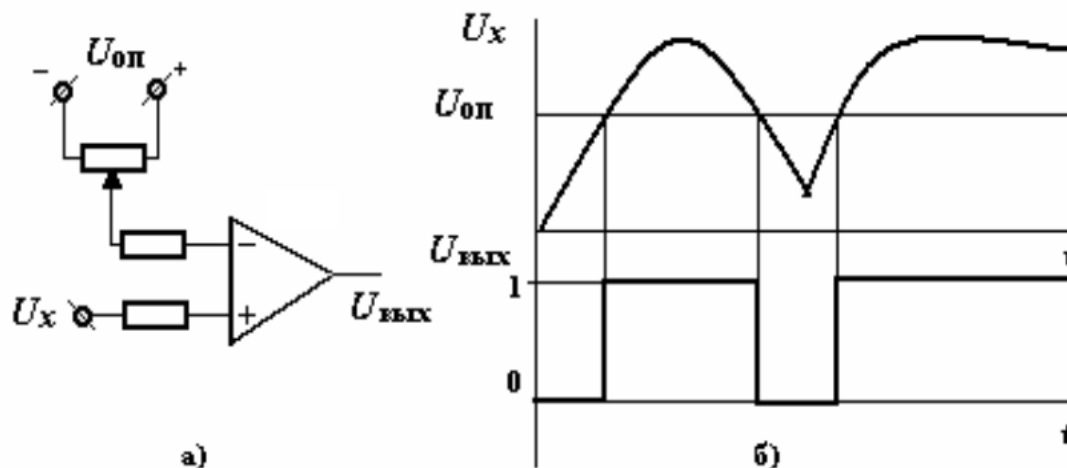


Рис. 8.7. Аналоговый компаратор

В аналоговом компараторе (рис.8.7 а) на инвертирующий вход подается опорное напряжение  $U_{оп}$ , величина которого может изменяться (рис.8.7. б). На неинвертирующий вход подается анализируемый сигнал  $U_x$ . Любое изменение разности входных напряжений вызывает скачок выходного напряжения  $U_{вых}$ . Если  $U_x \geq U_{оп}$ , то на выходе компаратора появляется логическая 1, если  $U_x < U_{оп}$ , то – логический 0. Если  $U_{оп} = 0$ , то такой компаратор называется нуль-органом.

Компаратор с гистерезисом — это компаратор, в котором добавлен механизм гистерезиса, что позволяет избежать ложных срабатываний, которые могут возникать из-за малых колебаний входного сигнала вокруг порога переключения. Компаратор с гистерезисом имеет два порога: один для включения и другой для выключения. Это означает, что компаратор будет переключаться в одно состояние при превышении одного порога, а для переключения обратно — потребуется, чтобы сигнал прошел через другой порог. Гистерезис обычно обеспечивается путем использования обратной связи, которая меняет порог включения и выключения компаратора в зависимости от его выходного состояния. Такая схема позволяет предотвратить флуктуации на выходе при малых колебаниях входного сигнала. Диапазон гистерезиса компаратора может быть увеличен путем добавления резистора между выходом компаратора и его прямым входом (+). (рис. 8.8). Это создает петлю обратной связи, в результате чего, когда происходит изменение сигнала на выходе, напряжения на входе (+) так же немного изменяется, в результате чего увеличивается разница напряжения между входами компаратора. Следует отметить, что обратная связь может быть подключена только на прямой вход (+).

Если выход компаратора находится в состоянии «выкл.», то на инверсном входе (-) напряжение будет выше напряжения на его прямом входе

(+) до того момента, когда выход перейдет в состояние «вкл.». При включенном выходе, на входе (-) напряжение становится немного ниже входного (+), до того момента, когда выход компаратора перейдет в выключенное состояние.

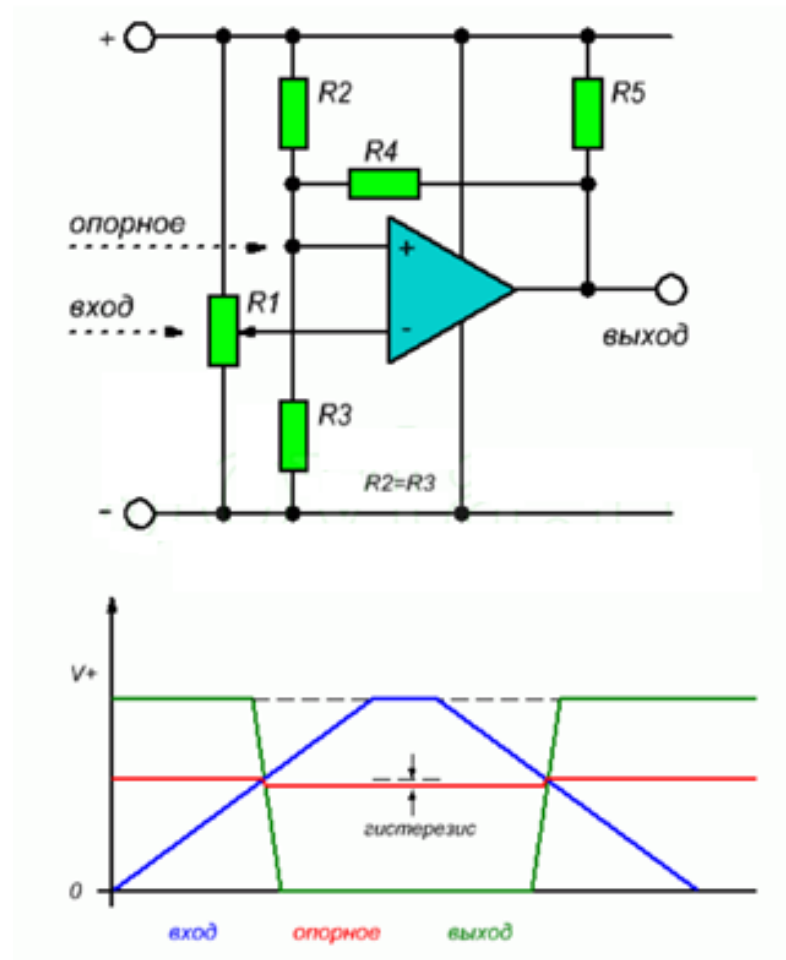


Рис.8.8. Компаратор с гистерезисом

Компаратор с гистерезисом — это эффективный инструмент для обеспечения надежной и стабильной работы электронных систем, где возможны малые колебания сигналов или присутствуют помехи. В сочетании с операционными усилителями, такие компараторы находят широкое применение в области защиты, управления и измерений, улучшая качество работы систем, устраняя ложные срабатывания и повышая стабильность работы.

### 8.3. Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)

**Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)** предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые.

К основным параметрам ЦАП относят разрешающую способность, время установления, погрешность нелинейности и др. *Разрешающая способность* — величина, обратная максимальному числу шагов квантования выходного аналогового сигнала. *Время установления*  $t_{уст}$  — интервал времени

от подачи кода на вход до момента, когда выходной сигнал войдет в заданные пределы, определяемые погрешностью. *Погрешность нелинейности* — максимальное отклонение графика зависимости выходного напряжения от напряжения, задаваемого цифровым сигналом, по отношению к идеальной прямой во всем диапазоне преобразования.

ЦАП является «связующим звеном» между аналоговой и цифровой электроникой. Существуют различные принципы построения ЦАП.

На рис. 8.8 приведена упрощенная схема ЦАП с суммированием весовых токов. Ключ  $S5$  замкнут только тогда, когда разомкнуты все ключи  $S1$ – $S4$  (при этом  $U_{\text{вых}} = 0$ ).  $U_0$  — опорное напряжение. Каждый резистор во входной цепи соответствует определенному разряду двоичного числа. По существу, этот ЦАП — инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя. Если замкнут один ключ  $S1$ , то  $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}$ , что соответствует единице в первом и нулям в остальных разрядах. Модуль выходного напряжения пропорционален числу, двоичный код которого определяется состоянием ключей  $S1$ – $S4$ . Токи ключей  $S1$ – $S4$  суммируются в точке  $a$  причем токи различных ключей различны (имеют разный «вес»). Это и определяет название

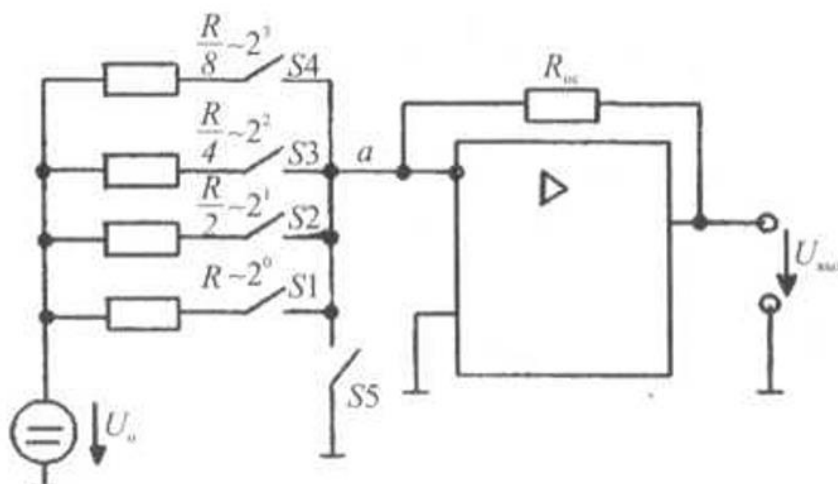


Рис.8.9 Упрощенная схема ЦАП с суммированием токов

На рис. 8.10 приведена схема ЦАП, выполненная на микросхеме КР572ПА1 и операционном усилителе КР140УД6.

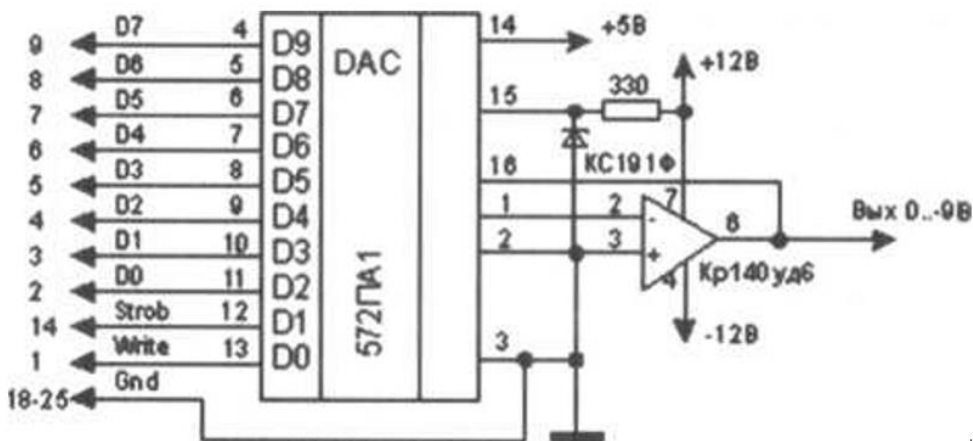


Рис.8.10. Типичная схема ЦАП, выполненная на микросхеме КР572ПА1 и операционном усилителе КР140УД6

#### 8.4. Аналого-цифровые преобразователи

**Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)** — устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Для такого преобразования необходимо осуществить квантование аналогового сигнала, т. е. мгновенные значения аналогового сигнала ограничить определенными уровнями, называемыми уровнями квантования. Характеристика идеального квантования имеет вид, приведенный на рис. 8.11.

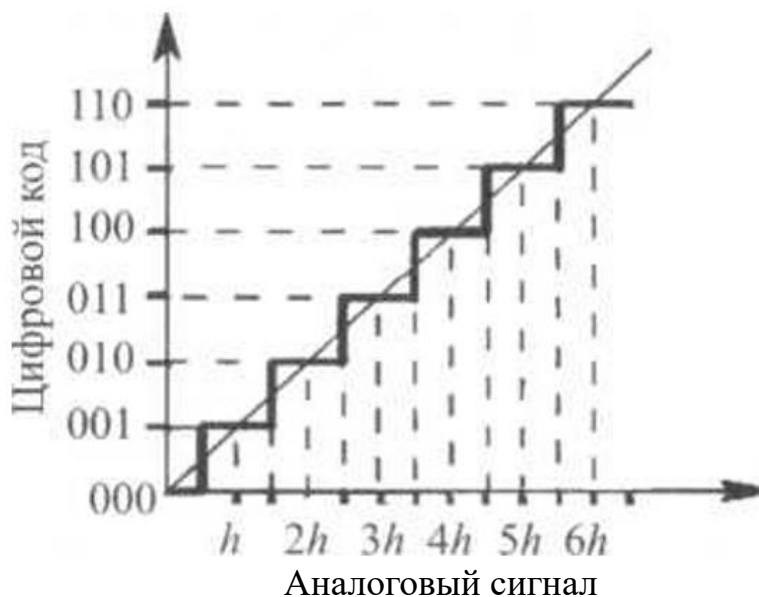


Рис.8.11. Квантование аналогового сигнала

*Квантование* представляет собой округление аналоговой величины до ближайшего уровня квантования, т. е. максимальная погрешность квантования равна  $\pm 0,5h$  ( $h$  — шаг квантования).

К основным характеристикам АЦП относят число разрядов, разрешающую способность, время преобразования, нелинейность и др. *Число разрядов* — количество разрядов кода, связанного с аналоговой величиной, которое может вырабатывать АЦП. *Разрешающая способность* — величина, обратная максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Так, 10-разрядный АЦП имеет разрешающую способность  $(2^{10} = 1024)^{-1}$ , т.е. при шкале АЦП, соответствующей 10 В, абсолютное значение шага квантования не превышает 10 мВ. *Время преобразования  $t_{пр}$*  — интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе АЦП до появления на его выходе соответствующего устойчивого кода.

Характерными методами преобразования являются следующие: параллельного преобразования аналоговой величины и последовательного преобразования.

Рассмотрим АЦП с *параллельным преобразованием входного аналогового сигнала* (рис. 8.12). По параллельному методу входное напряжение одновременно сравнивают с  $n$ -опорными напряжениями и определяют, между какими двумя опорными напряжениями оно лежит. При этом результат получают быстро, но схема оказывается достаточно сложной. Например, если  $U_{вх} > 3/2U$ , но меньше  $5/2U$ , то на выходах двух нижних ОУ появляется напряжение  $+E_{пит}$ , что приводит к появлению на выходах кодирующего преобразователя (КП) кода 010.

Рассмотрим конкретный вариант АЦП с *последовательным преобразованием входного сигнала* (последовательного счета), который называют АЦП со следящей связью (рис. 8.13). В АЦП рассматриваемого типа используется ЦАП и реверсивный счетчик, сигнал которого обеспечивает изменение напряжения на выходе ЦАП.

Настройка схемы такова, что обеспечивается примерное равенство напряжений на входе  $U_{вх}$  и на выходе ЦАП —  $U$ . Если входное напряжение  $U_{вх}$  больше напряжения  $U$  на выходе ЦАП, то счетчик переводится в режим прямого отсчета и код на его выходе увеличивается, обеспечивая увеличение напряжения на выходе ЦАП. В момент равенства  $U_{вх}$  и  $U$  счет прекращается, с выхода реверсивного счетчика снимается код, соответствующий входному напряжению.

Наилучшим быстродействием, конечно, обладает АЦП параллельного преобразования.

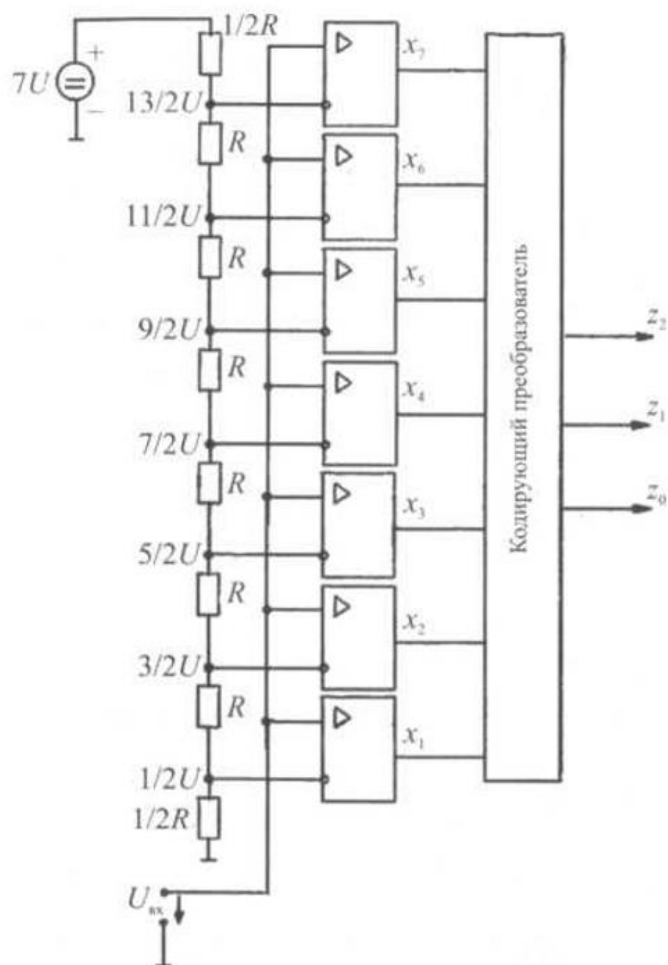


Рис.8.12 АЦП с параллельным преобразованием входного аналогового сигнала

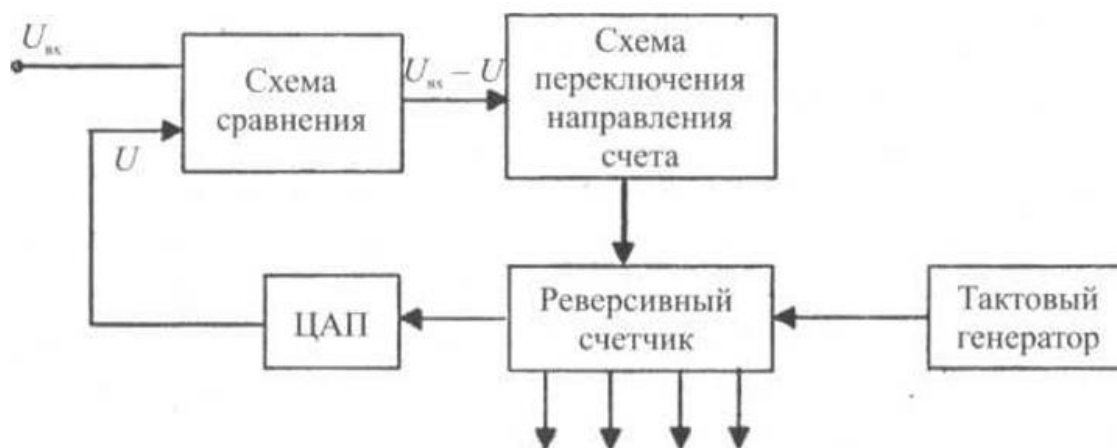


Рис. 8.13. Структурная схема АЦП с последовательным преобразованием входного сигнала

## 8.5. Устройства выборки и хранения

Для правильной работы большинства схем аналого-цифрового преобразования требуется, особенно это существенно для АЦП с последовательным уравниванием, чтобы входное напряжение в течение

некоторого времени, называемым (*время преобразования*) оставалось неизменным. Поскольку входной сигнал в течение времени преобразования может меняться, его фиксируют с помощью устройства выборки-хранения.

Чаще всего устройство выборки и хранения интегрируют в одном кристалле с АЦП, однако существуют и специализированные микросхемы, выполняющие эту функцию. Устройство выборки и хранения имеет аналоговый вход, аналоговый выход и управляющий вход управления электронным ключом.

Запоминающим элементом в устройстве выборки и хранения является электрический конденсатор, его принято называть «запоминающим конденсатором». Для перезаряда конденсатора используется электронный ключ. В качестве электронного ключа обычно используются полевые транзисторы с изолированным затвором.

Для обеспечения высокого входного и низкого выходного сопротивления используются буферные повторители напряжения с высоким входным сопротивлением. Входной буферный повторитель развязывает источник сигнала от запоминающего конденсатора, а выходной буферный усилитель развязывает конденсатор от потребителя сигнала в режиме хранения (рис. 8.14).

При замыкании ключа конденсатор перезаряжается до нового значения напряжения — напряжения выхода входного повторителя, практически, с точностью до ошибки повторителя, равному входному сигналу, если длительность замкнутого состояния ключа много больше постоянной времени перезаряда конденсатора. Перезаряд происходит с постоянной времени  $\tau_t$ :

$$\tau_t = (r_0 + r_{\text{son}})C$$

где  $r_0$  — выходное сопротивление входного буферного повторителя;

$r_{\text{son}}$  — сопротивление ключа в открытом состоянии;

$C$  — ёмкость запоминающего конденсатора.

В режиме хранения ключ разомкнут и конденсатор медленно перезаряжается через параллельно включённые сопротивление утечки через диэлектрик конденсатора  $r_c$ , сопротивление закрытого ключа  $r_{\text{soff}}$  и входное сопротивление выходного буферного повторителя  $r_i$  с постоянной времени  $\tau_h$ :

$$\tau_h = (r_c \parallel r_{\text{soff}} \parallel r_i)C$$

Для быстрого перезаряда конденсатора во время выборки выгодно выбирать ёмкость конденсатора как можно меньше, но, с другой стороны, при маленькой ёмкости ухудшаются точность устройства в режиме хранения, так как выходной сигнал медленно «сползает». Для устранения этого недостатка прибегают к последовательному включению 2 аналогичных устройства выборки-хранения, в первом из которых применён конденсатор малой ёмкости, а во втором — большой

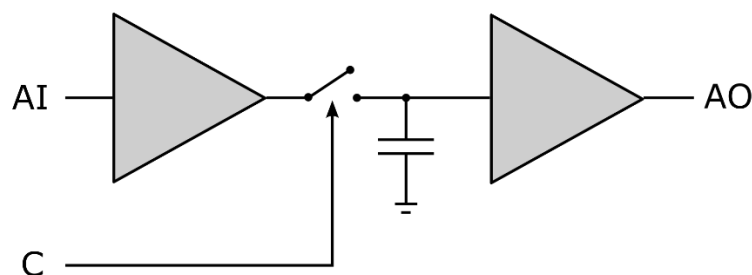


Рис.8.14. Упрощённая схема устройства выборки и хранения. AI— аналоговый вход, АО— аналоговый выход, С— вход управления.

### Вопросы к главе 8

1. Что собой представляют интегральные микросхемы? Виды интегральных микросхем.
2. Что называют операционным усилителем?
3. Назовите виды схем на операционных усилителях.
4. Где применяются и что собой представляют компараторы?
5. Назначение цифроаналоговых преобразователей, их виды и характеристики.
6. Назначение аналого-цифровых преобразователей, их виды и характеристики
7. Назначение устройств выборки и хранения.

## Глава 9. Цифровые схемы автоматики

### 9.1. Микропроцессоры

**Микропроцессор (МП)** – это программно-управляемое электронное цифровое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненное на одной или нескольких интегральных схемах с высокой степенью интеграции электронных элементов.

Функции микропроцессора:

- вычисление адресов команд и операндов;
- выборка и дешифрация команд из основной памяти;
- выборка данных из основной памяти, регистров микропроцессорной памяти и регистров адаптеров внешних устройств;
- прием и обработка запросов и команд от адаптеров на обслуживание внешних устройств;
- обработка данных и их запись в основную память, регистры микропроцессорной памяти и регистры адаптеров внешних устройств;
- выработка управляющих сигналов для всех прочих узлов и блоков ПК;
- переход к следующей команде.

**По числу больших интегральных схем (БИС)** в микропроцессорном комплекте различают микропроцессоры однокристальные, многокристальные и многокристальные секционные.

Процессоры даже самых простых ЭВМ имеют сложную функциональную структуру, содержат большое количество электронных элементов и множество разветвленных связей. Изменять структуру процессора необходимо так, чтобы полная принципиальная схема или ее части имели количество элементов и связей, совместимое с возможностями БИС. При этом микропроцессоры приобретают внутреннюю магистральную архитектуру, т.е. в них к единой внутренней информационной магистрали подключаются все основные функциональные блоки (арифметико-логический, рабочих регистров, стека, прерываний, интерфейса, управления и синхронизации и др.).

Для обоснования классификации микропроцессоров по числу БИС надо распределить все аппаратные блоки процессора между основными тремя функциональными частями: операционной, управляющей и интерфейсной. Сложность операционной и управляющей частей процессора определяется их разрядностью, системой команд и требованиями к системе прерываний; сложность интерфейсной части разрядностью и возможностями подключения других устройств ЭВМ (памяти, внешних устройств, датчиков и исполнительных механизмов и др.). Интерфейс процессора содержит несколько десятков информационных шин данных (ШД), адресов (ША) и управления (ШУ).

**Однокристальные микропроцессоры** получают при реализации всех аппаратных средств процессора в виде одной БИС или СБИС (сверхбольшой интегральной схемы). По мере увеличения степени интеграции элементов в кристалле и числа выводов корпуса параметры однокристальных микропроцессоров улучшаются. Однако возможности однокристальных микропроцессоров ограничены аппаратными ресурсами кристалла и корпуса. Для получения многокристального микропроцессора необходимо провести разбиение его логической структуры на функционально законченные части и реализовать их в виде БИС (СБИС). Функциональная законченность БИС многокристального микропроцессора означает, что его части выполняют заранее определенные функции и могут работать автономно.

На рис. 9.1,а показано функциональное разбиение структуры процессора при создании трехкристального микропроцессора (пунктирные линии), содержащего БИС операционного (ОП), БИС управляющего (УП) и БИС интерфейсного (ИП) процессоров

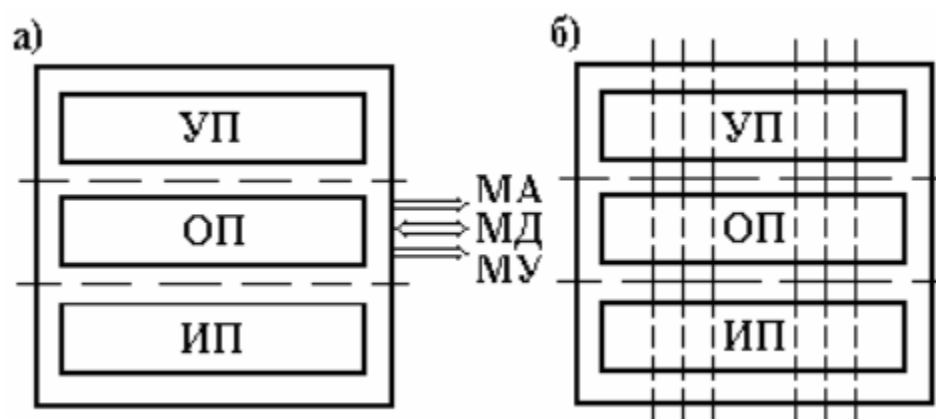


*Рис. 9.1 Функциональная структура процессора (а) и ее разбиение для реализации процессора в виде комплекта секционных БИС*

Операционный процессор служит для обработки данных, управляющий процессор выполняет функции выборки, декодирования и вычисления адресов операндов и также генерирует последовательности микрокоманд. Автономность работы и большое быстродействие БИС УП позволяет выбирать команды из памяти с большей скоростью, чем скорость их исполнения БИС ОП. При этом в УП образуется очередь еще не исполненных команд, а также заранее подготавливаются те данные, которые потребуются ОП в следующих циклах работы. Такая опережающая выборка команд экономит время ОП на ожидание операндов, необходимых для выполнения команд программ. Интерфейсный процессор позволяет подключить память и периферийные средства к микропроцессору; он, по существу, является сложным контроллером для устройств ввода/вывода информации. БИС ИП выполняет также функции канала прямого доступа к памяти.

Выбираемые из памяти команды распознаются и выполняются каждой частью микропроцессора автономно, и поэтому может быть обеспечен режим одновременной работы всех БИС МП, т.е. конвейерный поточный режим исполнения последовательности команд программы (выполнение последовательности с небольшим временным сдвигом). Такой режим работы значительно повышает производительность микропроцессора.

**Многокристальные секционные микропроцессоры** получаются в том случае, когда в виде БИС реализуются части (секции) логической структуры процессора при функциональном разбиении ее вертикальными плоскостями (рис. 1, б). Для построения многоразрядных микропроцессоров при параллельном включении секций БИС в них добавляются средства "стыковки".

Для создания высокопроизводительных многоразрядных микропроцессоров требуется столь много аппаратных средств, не реализуемых в доступных БИС, что может возникнуть необходимость еще и в функциональном разбиении структуры микропроцессора горизонтальными плоскостями. В результате

рассмотренного функционального разделения структуры микропроцессора на функционально и конструктивно законченные части создаются условия реализации каждой из них в виде БИС. Все они образуют комплект секционных БИС МП.

Таким образом, микропроцессорная секция это БИС, предназначенная для обработки нескольких разрядов данных или выполнения определенных управляющих операций. Секционность БИС МП определяет возможность "наращивания" разрядности обрабатываемых данных или усложнения устройств управления микропроцессора при "параллельном" включении большего числа БИС.

Однокристалльные и трехкристалльные БИС МП, как правило, изготавливают на основе микроэлектронных технологий униполярных полупроводниковых приборов, а многокристалльные секционные БИС МП на основе технологии биполярных полупроводниковых приборов. Использование многокристалльных микропроцессорных высокоскоростных биполярных БИС, имеющих функциональную законченность при малой физической разрядности обрабатываемых данных и монтируемых в корпус с большим числом выводов, позволяет организовать разветвление связи в процессоре, а также осуществить конвейерные принципы обработки информации для повышения его производительности.

**По назначению** различают универсальные и специализированные микропроцессоры.

Универсальные микропроцессоры могут быть применены для решения широкого круга разнообразных задач. При этом их эффективная производительность слабо зависит от проблемной специфики решаемых задач. Специализация МП, т.е. его проблемная ориентация на ускоренное выполнение определенных функций позволяет резко увеличить эффективную производительность при решении только определенных задач.

Среди специализированных микропроцессоров можно выделить различные микроконтроллеры, ориентированные на выполнение сложных последовательностей логических операций, математические МП, предназначенные для повышения производительности при выполнении арифметических операций за счет, например, матричных методов их выполнения, МП для обработки данных в различных областях применений и т. д. С помощью специализированных МП можно эффективно решать новые сложные задачи параллельной обработки данных. Например, конволюция позволяет осуществить более сложную математическую обработку сигналов, чем широко используемые методы корреляции. Последние в основном сводятся к сравнению всего двух серий данных: входных, передаваемых формой сигнала, и фиксированных опорных и к определению их подобия. Конволюция дает возможность в реальном масштабе времени находить

соответствие для сигналов изменяющейся формы путем сравнения их с различными эталонными сигналами, что, например, может позволить эффективно выделить полезный сигнал на фоне шума.

Разработанные однокристалльные конвольверы используются в устройствах опознавания образов в тех случаях, когда возможности сбора данных превосходят способности системы обрабатывать эти данные.

**По виду обрабатываемых входных сигналов** различают цифровые и аналоговые микропроцессоры. Сами микропроцессоры – цифровые устройства, однако, могут иметь встроенные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Поэтому входные аналоговые сигналы передаются в МП через преобразователь в цифровой форме, обрабатываются и после обратного преобразования в аналоговую форму поступают на выход. С архитектурной точки зрения такие микропроцессоры представляют собой аналоговые функциональные преобразователи сигналов и называются аналоговыми микропроцессорами. Они выполняют функции любой аналоговой схемы (например, производят генерацию колебаний, модуляцию, смещение, фильтрацию, кодирование и декодирование сигналов в реальном масштабе времени и т.д., заменяя сложные схемы, состоящие из операционных усилителей, катушек индуктивности, конденсаторов и т.д.). При этом применение аналогового микропроцессора значительно повышает точность обработки аналоговых сигналов и их воспроизводимость, а также расширяет функциональные возможности за счет программной "настройки" цифровой части микропроцессора на различные алгоритмы обработки сигналов.

Обычно в составе однокристалльных аналоговых МП имеется несколько каналов аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования. В аналоговом микропроцессоре разрядность обрабатываемых данных достигает 24 бит и более, большое значение уделяется увеличению скорости выполнения арифметических операций.

Отличительная черта аналоговых микропроцессоров способность к переработке большого объема числовых данных, т.е. к выполнению операций сложения и умножения с большой скоростью при необходимости даже за счет отказа от операций прерываний и переходов. Аналоговый сигнал, преобразованный в цифровую форму, обрабатывается в реальном масштабе времени и передается на выход обычно в аналоговой форме через цифро-аналоговый преобразователь. При этом согласно теореме Котельникова частота квантования аналогового сигнала должна вдвое превышать верхнюю частоту сигнала.

Сравнение цифровых микропроцессоров производится сопоставлением времени выполнения ими списков операций. Сравнение же аналоговых микропроцессоров производится по количеству эквивалентных звеньев аналого-цифровых фильтров рекурсивных фильтров второго порядка.

Производительность аналогового микропроцессора определяется его способностью быстро выполнять операции умножения: чем быстрее осуществляется умножение, тем больше эквивалентное количество звеньев фильтра в аналоговом преобразователе и тем более сложный алгоритм преобразования цифровых сигналов можно задавать в микропроцессоре.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования аналоговых микропроцессоров является повышение их универсальности и гибкости. Поэтому вместе с повышением скорости обработки большого объема цифровых данных будут развиваться средства обеспечения развитых вычислительных процессов обработки цифровой информации за счет реализации аппаратных блоков прерывания программ и программных переходов.

**По характеру временной организации работы** микропроцессоры делят на синхронные и асинхронные.

**Синхронные микропроцессоры** – микропроцессоры, в которых начало и конец выполнения операций задаются устройством управления (время выполнения операций в этом случае не зависит от вида выполняемых команд и величин операндов).

**Асинхронные микропроцессоры** позволяют начало выполнения каждой следующей операции определить по сигналу фактического окончания выполнения предыдущей операции. Для более эффективного использования каждого устройства микропроцессорной системы в состав асинхронно работающих устройств вводят электронные цепи, обеспечивающие автономное функционирование устройств. Закончив работу над какой-либо операцией, устройство вырабатывает сигнал запроса, означающий его готовность к выполнению следующей операции. При этом роль естественного распределителя работ принимает на себя память, которая в соответствии с заранее установленным приоритетом выполняет запросы остальных устройств по обеспечению их командной информацией и данными.

**В зависимости от набора и порядка выполнения команд** процессоры делятся на четыре класса.

**CISC** (complex instruction set command) есть традиционная архитектура, в которой центральный процессор использует микропрограммы для выполнения исчерпывающего набора команд. Они могут иметь различную длину, методы адресации и требуют сложных электронных цепей для декодирования и исполнения. В течение долгих лет производители компьютеров разрабатывали и воплощали в изделиях все более сложные и полные системы команд. Однако анализ работы процессоров показал, что в течение примерно 80 % времени выполняется лишь 20 % большого набора команд. Поэтому была поставлена задача оптимизации выполнения небольшого по числу, но часто используемых команд.

В 1974 г. John Cocke (IBM Research) решил испытать подход, который мог бы существенно уменьшить количество машинных команд в центральном процессоре. В середине 70-х это привело многих производителей компьютеров к пересмотру своих позиций и к разработке центрального процессора с весьма ограниченным набором команд.

**RISC** (reduced instruction set command) – процессор, функционирующий с сокращенным набором команд. Так, в процессоре CISC для выполнения одной команды необходимо в большинстве случаев 10 и более тактов. Что же касается процессоров RISC, то они близки к тому, чтобы выполнять по одной команде в каждом такте. Следует также иметь в виду, что благодаря своей простоте процессоры RISC не патентуются. Это также способствует их быстрой разработке и широкому производству. Между тем, в сокращенный набор RISC вошли только наиболее часто используемые команды.

Первый процессор RISC был создан корпорацией IBM в 1979 г. И имел шифр IBM 801. В настоящее время процессоры RISC получили широкое распространение. Современные процессоры RISC характеризуются следующим:

- упрощенный набор команд, имеющих одинаковую длину;
- большинство команд выполняются за один такт процессора;
- отсутствуют макрокоманды, усложняющие структуру процессора и уменьшающие скорость его работы;
- взаимодействие с оперативной памятью ограничивается операциями пересылки данных;
- резко уменьшено число способов адресации памяти (не используется косвенная адресация);
- используется конвейер команд, позволяющий обрабатывать несколько из них одновременно;
- применяется высокоскоростная память.

Новый подход к архитектуре процессора значительно сократил площадь, требуемую для него на кристалле интегральной схемы. Это позволило резко увеличить число регистров. В современном процессоре RISC уже используется более 100 регистров. В результате процессор на 20 – 30 % реже обращается к оперативной памяти, что также повысило скорость обработки данных. Упростилась топология процессора, выполняемого в виде одной интегральной схемы, сократились сроки ее разработки, она стала дешевле.

Начиная с процессора Pentium, корпорация Intel начала внедрять элементы RISC-технологий в свои изделия.

**MISC** (minimum instruction set command) – процессор, работающий с минимальным набором длинных команд.

Увеличение разрядности процессоров привело к идее укладки нескольких команд в одно слово (связку, bound) размером 128 бит. Оперируя с одним

словом, процессор получил возможность обрабатывать сразу несколько команд. Это позволило использовать возросшую производительность компьютера и его возможность обрабатывать одновременно несколько потоков данных.

Процессор MISC, как и процессор RISC? Характеризуется небольшим набором чаще всего встречающихся команд. Вместе с этим принцип команд VLIM обеспечивает выполнение группы команд за один цикл работы процессора. Порядок выполнения команд распределяется таким образом, чтобы в максимальной степени загрузить маршруты, по которым проходят потоки данных. Таким образом, архитектура MISC объединила вместе суперскалярную (многопоточную) и VLIM концепции. Компоненты процессора просты и работают с высокими скоростями.

**VLIM** (Very Length Instruction Memory) – процессор, работающий с системой команд сверхбольшой разрядности.

Идея технологии VLIM заключается в том, что создается специальный компилятор планирования, который перед выполнением прикладной программы проводит ее анализ, и по множеству ветвей последовательности операций определяет группу команд, которые могут выполняться параллельно. Каждая такая группа образует одну сверхдлинную команду. Это позволяет решать две важные задачи. Во-первых, в течение одного такта выполнять группу коротких («обычных») команд. Во-вторых, упростить структуру процессора. Этим технология VLIM отличается от суперскалярности. В последнем случае отбор групп одновременно выполняемых команд происходит непосредственно в ходе выполнения прикладной программы (а не заранее). Из-за чего усложняется структура процессора и замедляется скорость его работы.

## **2. Характеристики микропроцессоров**

Микропроцессор характеризуется:

- 1) тактовой частотой: указывает, сколько элементарных операций (тактов) микропроцессор выполняет в 1 секунду. Тактовая частота измеряется в МГц. Следует заметить, что разные модели МП выполняют одни и те же операции (например, сложение и умножение) за разное число тактов. Чем выше модель, тем, как правило, меньше тактов требуется для выполнения одних и тех же операций;
- 2) разрядностью, т.е. максимальным числом одновременно обрабатываемых двоичных разрядов.

Разрядность МП обозначается  $m/n/k/$  и включает:

- $m$  – разрядность внутренних регистров, определяет принадлежность к тому или иному классу процессоров;
- $n$  – разрядность шины данных, определяет скорость передачи информации;
- $k$  – разрядность шины адреса, определяет размер адресного пространства.

Например, МП i8088 характеризуется значениями  $m/n/k=16/8/20$ ;

3) объемом кэш-памяти, которая имеет два уровня: L1 – память 1-го уровня, находящаяся внутри основной микросхемы микропроцессора и работающая всегда на полной частоте микропроцессора; L2 – память 2-го уровня, кристалл, размещаемый на плате микропроцессора и связанный с ядром внутренней микропроцессорной шиной, может работать на полной или половинной частоте микропроцессора.

4) архитектурой. Понятие архитектуры микропроцессора включает в себя систему команд и способы адресации, возможность совмещения выполнения команд во времени, наличие дополнительных устройств в составе микропроцессора, принципы и режимы его работы. Выделяют понятия микроархитектуры и макроархитектуры.

**Микроархитектура микропроцессора** – это аппаратная организация и логическая структура микропроцессора, регистры, управляющие схемы, арифметико-логические устройства, запоминающие устройства и связывающие их информационные магистрали.

**Макроархитектура** – это система команд, типы обрабатываемых данных, режимы адресации и принципы работы микропроцессора.

### 3. Структура микропроцессора

*Устройство управления* является функционально наиболее сложным устройством ПК. Оно вырабатывает управляющие сигналы, поступающие по кодовым шинам инструкций во все блоки машины.

Упрощенная функциональная схема УУ показана на рис.9.2. Здесь представлены:

*Регистр команд* - запоминающий регистр, в котором хранится код команды: код выполняемой операции и адреса операндов, участвующих в операции. Регистр команд расположен в интерфейсной части МП, в блоке регистров команд.

*Дешифратор операций* - логический блок, выбирающий в соответствии с поступающим из регистра команд кодом операции (КОП) один из множества имеющихся у него выходов.

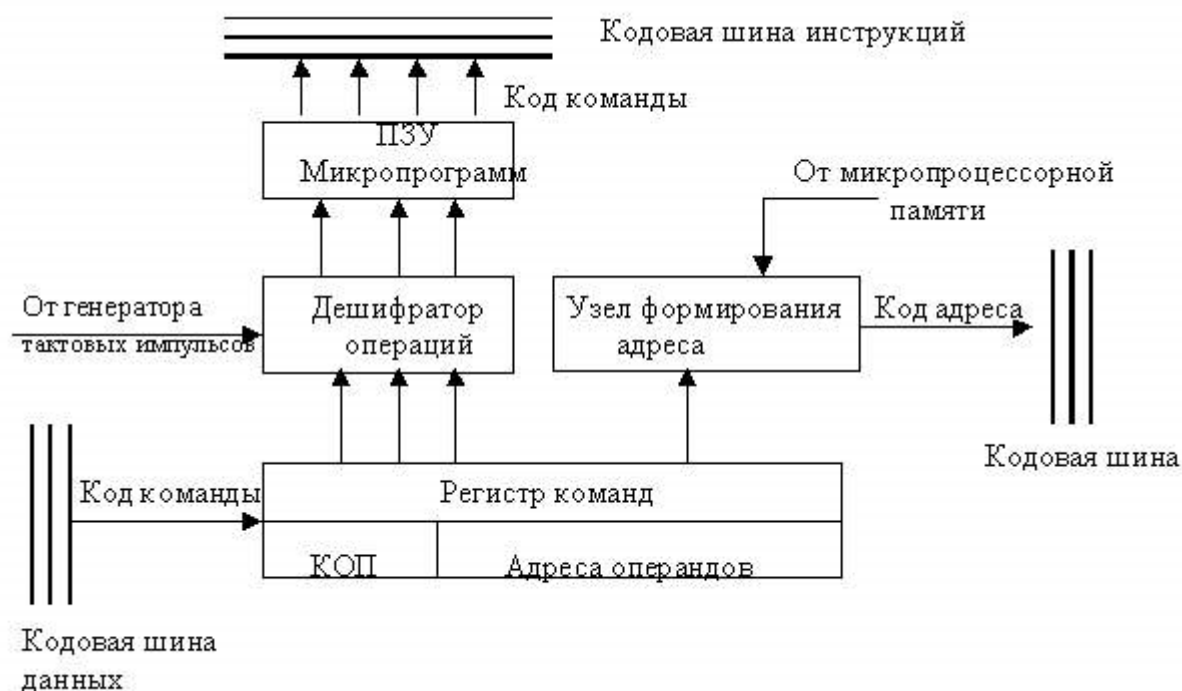


*Рис. 9.2. Увеличенная функциональная схема устройства управления*

*Постоянное запоминающее устройство микропрограмм* - хранит в своих ячейках управляющие сигналы (импульсы), необходимые для выполнения в блоках ПК операций обработки информации. Импульс по выбранному дешифратором операций в соответствии с кодом операции считывает из ПЗУ микропрограмм необходимую последовательность управляющих сигналов.

*Узел формирования адреса* (находится в интерфейсной части МП) - устройство, вычисляющее полный адрес ячейки памяти (регистра) по реквизитам, поступающим из регистра команд и регистров МПП (микропроцессорная память) - память небольшой емкости, но чрезвычайно высокого быстродействия (время обращения к МПП, т. е. время, необходимое на поиск, запись или считывание информации из этой памяти, измеряется наносекундами - тысячными долями микросекунды).

*Кодовые шины данных, адреса и инструкций* - часть внутренней интерфейсной шины микропроцессора. В общем случае УУ формирует управляющие сигналы для выполнения следующих основных процедур:

- выборки из регистра-счетчика адреса команды МПП адреса ячейки ОЗУ, где хранится очередная команда программы;
- выборки из ячеек ОЗУ кода очередной команды и приема считанной команды в регистр команд;
- расшифровки кода операции и признаков выбранной команды;
- считывания из соответствующих расшифрованному коду операции ячеек ПЗУ микропрограмм управляющих сигналов (импульсов), определяющих во всех блоках машины процедуры выполнения заданной операции, и пересылки управляющих сигналов в эти блоки;

- считывания из регистра команд и регистров МПП отдельных составляющих адресов операндов (чисел), участвующих в вычислениях, и формирования полных адресов операндов;
- выборки операндов (по сформированным адресам) и выполнения заданной операции обработки этих операндов;
- записи результатов операции в память;
- формирования адреса следующей команды программы.

#### Арифметико-логическое устройство

*Арифметико-логическое устройство* предназначено для выполнения арифметических и логических операций преобразования информации.

Функционально АЛУ (рис.9.3) состоит обычно из двух регистров, сумматора и схем управления (местного устройства управления).

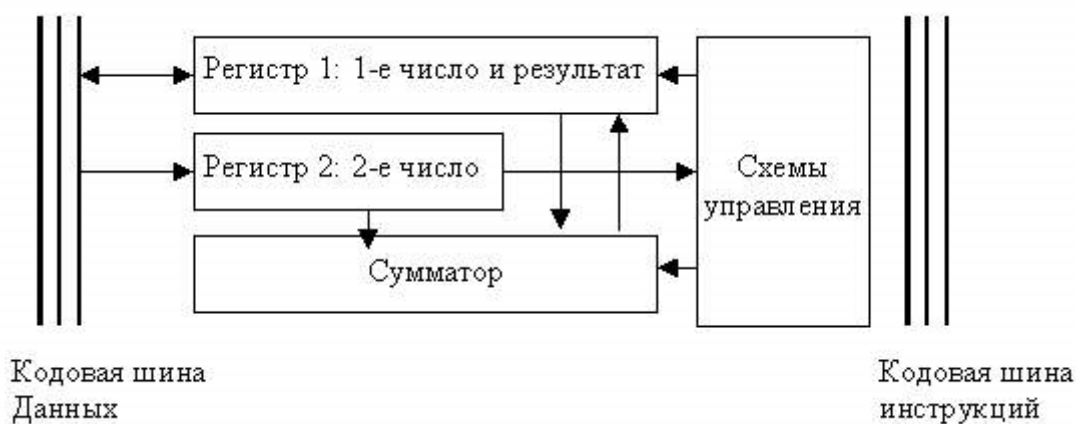


*Рис. 9.3. Функциональная схема АЛУ*

*Сумматор* - вычислительная схема, выполняющая процедуру сложения поступающих на ее вход двоичных кодов; сумматор имеет разрядность двойного машинного слова.

*Регистры* - быстродействующие ячейки памяти различной длины: регистр 1 (Rg1) имеет разрядность двойного слова, а регистр 2 (Rg2) - разрядность слова. При выполнении операций в Rg1 помещается первое число, участвующее в операции, а по завершении операции - результат; в Rg2 - второе число, участвующее в операции (по завершении операции информация в нем не изменяется). Регистр 1 может и принимать информацию с кодовых шин данных, выдавать информацию на них, регистр 2 только получает информацию с этих шин.

*Схемы управления* принимают по кодовым шинам инструкций управляющие сигналы от устройства управления и преобразуют их в сигналы для управления работой регистров и сумматора АЛУ.

АЛУ выполняет арифметические операции (+, -, \*, :) только над двоичной информацией с запятой, фиксированной после последнего разряда, т.е. только над целыми двоичными числами.

Выполнение операций над двоичными числами с плавающей запятой и над двоично-кодированными десятичными числами осуществляется или с привлечением математического сопроцессора, или по специально составленным программам.

Микропроцессорная память

*Микропроцессорная память* - память небольшой емкости, но чрезвычайно высокого быстродействия (время обращения к МПП, т.е. время, необходимое на поиск, запись или считывание информации из этой памяти, измеряется наносекундами - тысячными долями микросекунды).

Она предназначена для кратковременного хранения, записи и выдачи информации, непосредственно в ближайшие такты работы машины, участвующей в вычислениях, МПП используется для обеспечения высокого быстродействия машины, ибо основная память не всегда обеспечивает скорость записи, поиска и считывания информации, необходимую для эффективной работы быстродействующего микропроцессора.

Микропроцессорная память состоит из быстродействующих *регистров* с разрядностью не менее машинного слова. Количество и разрядность регистров в разных микропроцессорах различны: от 14 двухбайтных регистров у МП 8086 до нескольких десятков регистров разной длины у МП Pentium.

*Регистры микропроцессора* делятся на регистры общего назначения и специальные.

*Специальные регистры* применяются для хранения различных адресов (адреса команды, например), признаков результатов выполнения операций и режимов работы ПК (регистр флагов, например) и др.

*Регистры общего назначения* являются универсальными и могут использоваться для хранения любой информации, но некоторые из них тоже должны быть обязательно задействованы при выполнении ряда процедур.

Интерфейсная часть микропроцессора

Интерфейсная часть МП предназначена для связи и согласования МП с системной шиной ПК, а также для приема, предварительного анализа команд выполняемой программы и формирования полных адресов операндов и команд.

Интерфейсная часть включает в свой состав адресные регистры МПП, узел формирования адреса, блок регистров команд, являющийся буфером команд в МП, внутреннюю интерфейсную шину МП и схемы управления шиной и портами ввода-вывода.

*Порты ввода-вывода* — это пункты системного интерфейса ПК, через которые МП обменивается информацией с другими устройствами. Всего портов у МП может быть 65536. Каждый порт имеет адрес - номер порта, соответствующий адресу ячейки памяти, являющейся частью устройства ввода-вывода, использующего этот порт, а не частью основной памяти компьютера.

Порт устройства содержит аппаратуру сопряжения и два регистра памяти - для обмена данными и обмена управляющей информацией. Некоторые внешние устройства используют и основную память для хранения больших объемов информации, подлежащей обмену. Многие стандартные устройства (НЖМД - накопитель на жёстких магнитных дисках, НГМД - накопитель на гибких магнитных дисках, клавиатура, принтер, сопроцессор и др.) имеют постоянно закрепленные за ними порты ввода-вывода.

*Схема управления шиной и портами* выполняет следующие функции:

- формирование адреса порта и управляющей информации для него (переключение порта на прием или передачу и др.);
- прием управляющей информации от порта, информации о готовности порта и его состоянии;
- организацию сквозного канала в системном интерфейсе для передачи данных между портом устройства ввода-вывода и МП.

Схема управления шиной и портами использует для связи с портами кодовые шины инструкций, адреса и данных системной шины: при доступе к порту МП посылает сигнал по КШИ (кодовой шине инструкций), который оповещает все устройства ввода-вывода, что адрес на КША (адресную кодовую шину) является адресом порта, а затем посылает и сам адрес порта. То устройство, адрес порта которого совпадает, дает ответ о готовности, после чего по КШД (кодовой шине данных) осуществляется обмен данными.

### **Режимы работы микропроцессорной системы**

Практически любая развитая микропроцессорная система (в том числе и компьютер) поддерживает три основных режима обмена по магистрали:

- программный обмен информацией;
- обмен с использованием прерываний (Interrupts);
- обмен с использованием прямого доступа к памяти (ПДП, DMA — Direct Memory Access).

Программный обмен информацией является основным в любой микропроцессорной системе. Он предусмотрен всегда, без него невозможны другие режимы обмена. В этом режиме процессор является единоличным хозяином (или задатчиком, Master) системной магистрали. Все операции (циклы) обмена информацией в данном случае инициируются только процессором, все они выполняются строго в порядке, предписанном исполняемой программой.

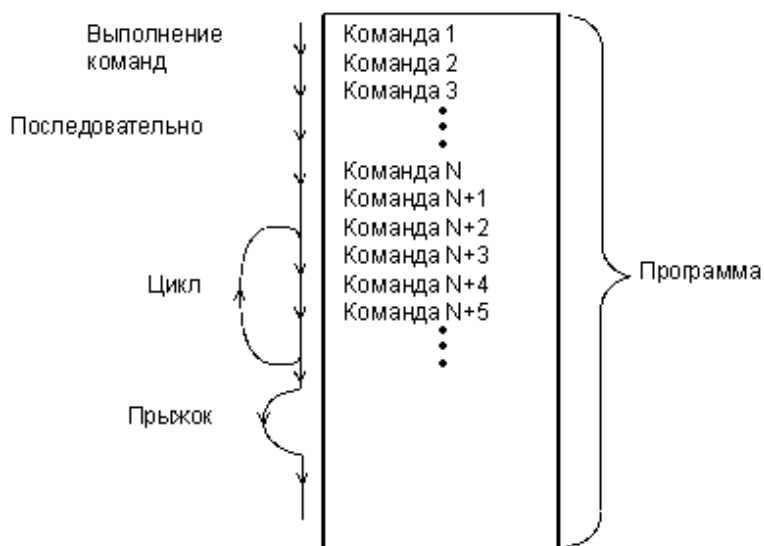


Рис. 9.4. Работы МП по программе

Обмен по прерываниям используется тогда, когда необходима реакция микропроцессорной системы на какое-то внешнее событие, на приход внешнего сигнала. В случае компьютера внешним событием может быть, например, нажатие на клавишу клавиатуры или приход по локальной сети пакета данных. Компьютер должен реагировать на это, соответственно, выводом символа на экран или же чтением и обработкой принятого по сети пакета.

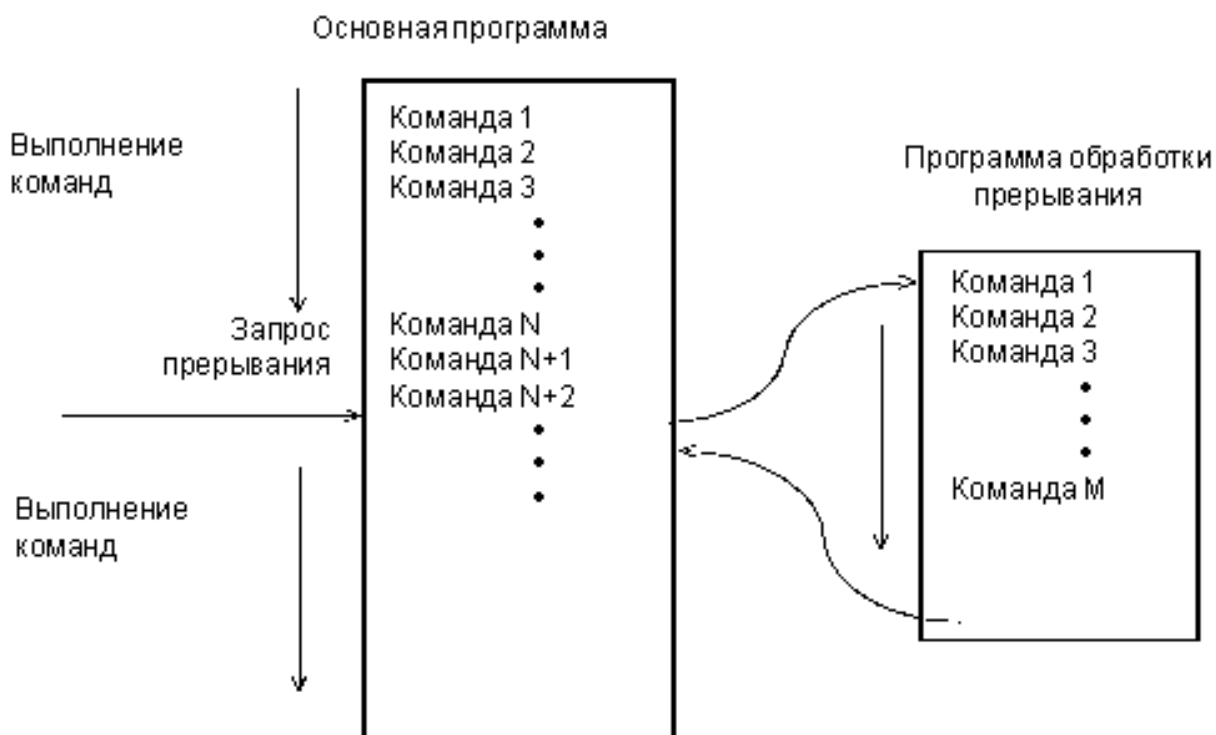


Рис. 9.5. Прерывание в МП

Прямой доступ к памяти (ПДП, DMA) — это режим, принципиально отличающийся от двух ранее рассмотренных режимов тем, что обмен по системной шине идет без участия процессора. Внешнее устройство, требующее обслуживания, сигнализирует процессору, что режим ПДП

необходим, в ответ на это процессор заканчивает выполнение текущей команды и отключается от всех шин, сигнализируя запросившему устройству, что обмен в режиме ПДП можно начинать.

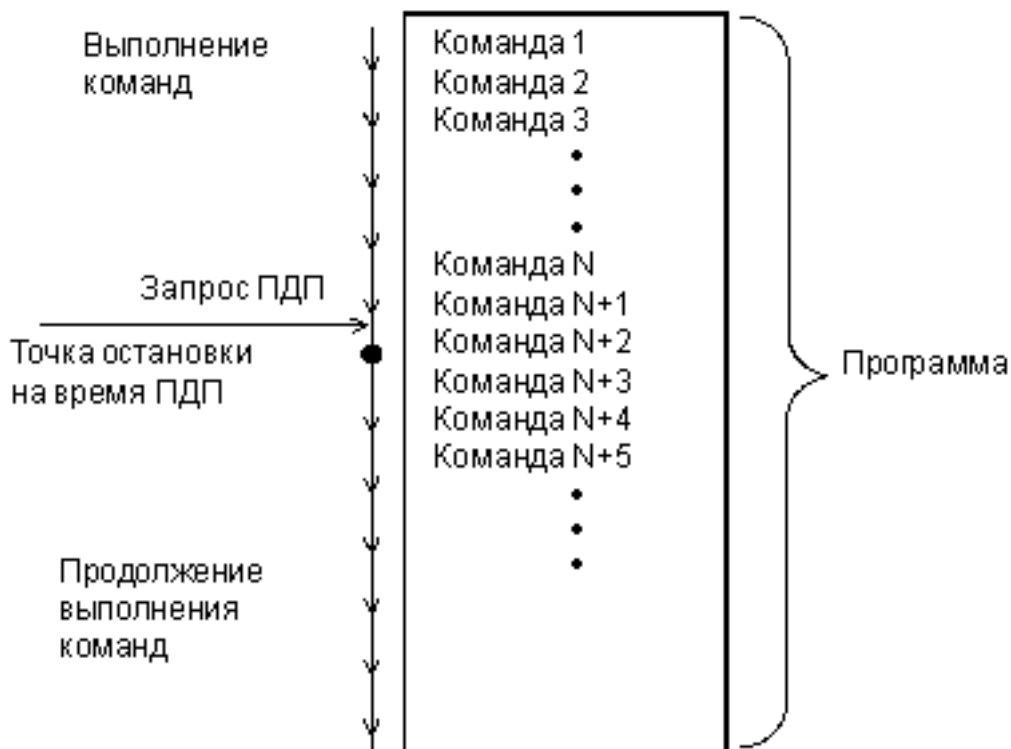


Рис. 9.6 а. Прямой доступ к памяти

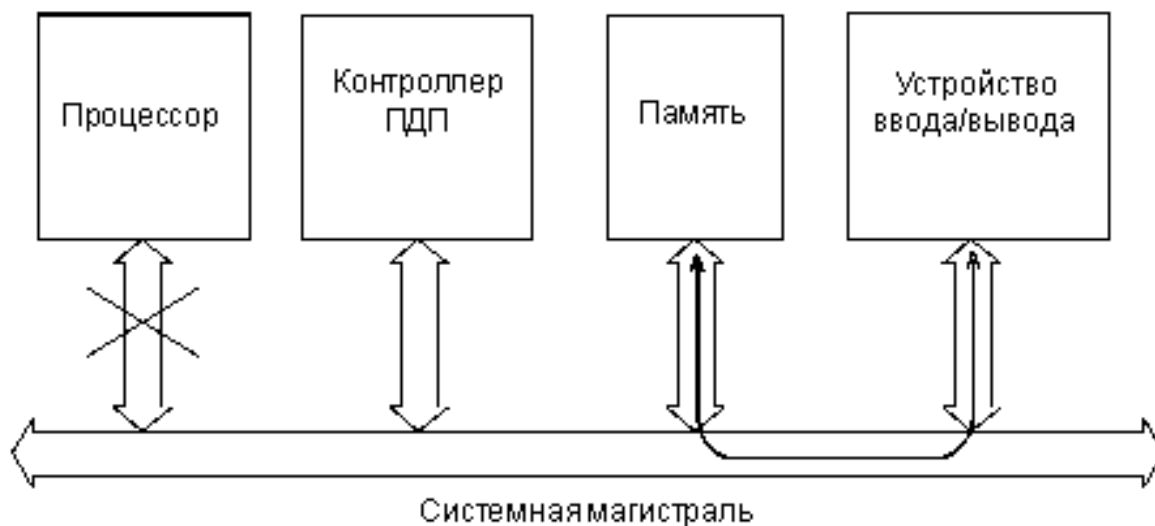


Рис. 9.6б. Прямой доступ к памяти

Понятно, что в этом случае требуется введение в систему дополнительного устройства (контроллера ПДП), которое будет осуществлять полноценный обмен по системной магистрали без всякого участия процессора. Причем процессор предварительно должен сообщить этому контроллеру ПДП, откуда ему следует брать информацию и/или куда ее следует помещать. Контроллер ПДП может считаться специализированным процессором, который

отличается тем, что сам не участвует в обмене, не принимает в себя информацию и не выдает ее.

## 9.2. Программируемый логический контроллер.

Целью программируемого контроллера, способного имитировать работу большого количества реле, была замена электромеханических реле на логические элементы.

Под понятием – программируемые логические контроллеры ПЛК (Programmable logic controllers, PLC) подразумеваются блочно-модульные микропроцессорные системы универсального и общего назначения, предназначенные для автоматизации в различных областях промышленности, техники и сферах инженерной деятельности.

Обобщённая структурная схема ПЛК показана на рис. 9.7. Аппаратный комплекс ПЛК конструктивно выполняется в виде единого модуля, содержащего плату микропроцессорной системы с возможностью расширения через разъёмы локальной шины и/или сетевого интерфейса. Расширительные модули (платы) входят в технически регламентированный состав устройств связи с объектом (УСО), осуществляя нормализацию и преобразование аналоговых (AI/AO) и дискретных (DI/DO) сигналов ввода/вывода (I/O) для ПЛК.

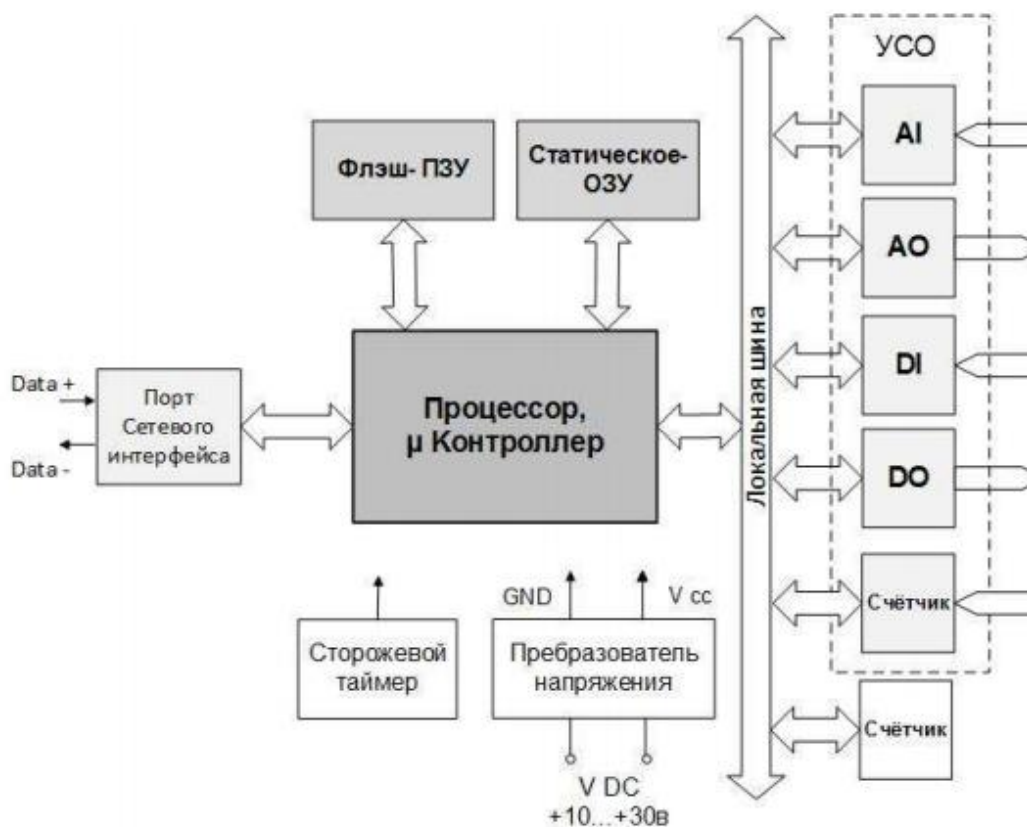


*Рис. 9.7. Обобщенная структурная схема ПЛК (PLC)*

Микропроцессорная система программируемого контроллера содержит:

- 1) центральный процессор ЦП (CPU) в основном выполняется на 32-разрядных процессорах. В некоторых семействах могут быть выполнены на базе однокристальных микроЭВМ (ОМЭВМ или микроконтроллеры);
- 2) память программ на основе флэша памяти постоянно-запоминающего устройства (ПЗУ), служащего для хранения исполняемых программ пользователя и долговременного хранения данных в защищённой области;
- 3) блок оперативно-запоминающего устройства памяти (ОЗУ);
- 4) сетевой интерфейс, он может быть встроенным или заменяемым в виде отдельного модуля;
- 5) источник питания модуля ПЛК, он может быть встроенным или выполнен в виде отдельно устанавливаемого блока.

Основное общепромышленное напряжение питания систем ПЛК контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) составляет 24 в постоянные тока (VDC).

ПЛК (PLC) — это программно-управляемый дискретный автомат (рис. 9.8), имеющий некоторое множество входов, подключенных посредством датчиков к объекту управления, и множество выходов, подключенных к исполнительным устройствам. ПЛК контролирует состояния входов и вырабатывает определённые последовательности программно заданных действий, отражающихся в изменении выходов.



*Рис. 9.8. Принцип функционирования логического контроллера*

СПК (свободно программируемый контроллер - ПЛК) включает в себя входной и выходной модули и центральный процессор. Входной модуль служит для преобразования поступающих сигналов в сигналы, которые могут быть обработаны СПК и переданы процессору. Выходной модуль преобразует сигнал СПК в сигналы, подходящие для исполнительных устройств. Обработка поступающих сигналов производится в процессоре в соответствии с программой, хранящейся в его памяти.

В зависимости от того, как центральный процессор связан с модулями входов и выходов СПК можно подразделить на компактные (моноблочные - входы, процессор и выходы в одном корпусе) и модульные. Модульный СПК можно компоновать индивидуально. Необходимые для практического применения модули (кроме цифровых входов-выходов, которые можно

дополнить, например, включая модули аналоговых сигналов, модуль позиционирования или связи) помещаются в корпус, где они связаны между собой общей шиной. За выбор состава модулей, в зависимости от поставленных задач, отвечает проектировщик.

Кассетные СПК - специальный тип модульного СПК, разработанного в течение последних нескольких лет. У этого контроллера некоторые индивидуальные или стандартные печатные платы монтируются в стандартном корпусе.

Распределенные ПЛК – модули ввода-вывода вынесены за пределы контроллера, выполняются в спецкорпусах и соединяются с контроллером при помощи промышленной сети с использованием интерфейсов, таких, как например RS-485. Модули могут быть расположены на значительном удалении от самого промышленного контроллера.

Мезонинная технология — это еще один из вариантов построения ПЛК. При такой системе построения все силовые цепи и устройства защиты контроллера выполняются на одной плате. Само же процессорное ядро с системой исполнения изготавливается на отдельной сменной (мезонной) плате. В результате таких нехитрых манипуляций появляется возможность составлять разные силовые развязки с разными микропроцессорами без изменения программного обеспечения. При необходимости процессор может быть заменен даже в готовой системе.

На современном этапе все большую популярность принимают контроллеры с многопроцессорным решением. В таких системах модули ввода-вывода имеют свои собственные микропроцессоры, которые выполняют необходимую предварительную обработку данных. Центральный модуль контроллера имеет отдельную магистраль (сеть) для работы с блоками ввода-вывода и отдельную скоростную магистраль для работы с памятью

**По способу крепления и конструктивному исполнению промышленные контроллеры подразделяются на:**

- Панельные – монтаж осуществляется на дверце шкафа или на панели;
- DIN-реечные - монтаж осуществляется внутри шкафа на DIN-рейку;
- Стоечные – монтаж осуществляется в стойке;
- Бескорпусные – применяется производителями оборудования OEM (Original Equipment Manufacturer) в специализированных конструктивах.

**В зависимости от области возможного применения промышленные контроллеры подразделяются на:**

- Общепромышленные универсальные ПЛК;
- Коммуникационные ПЛК;
- ПЛК управления роботами;
- ПЛК спецназначения;

- ПЛК управления перемещением и позиционированием.
- ПИД-контроллеры;

**По способу программирования** контроллеры бывают:

- программируемые с лицевой панели контроллера;
- программируемые переносным программатором;
- программируемые с помощью дисплея, мыши и клавиатуры;
- программируемые с помощью персонального компьютера.

**Контроллеры могут программироваться на следующих языках:**

- на классических алгоритмических языках (Си, Си # шарп, Паскаль, Visual Basic);
- на языках МЭК 61131-3:
  - список инструкций (IL— Instruction List);
  - структурированный текст (ST— Structured Text)
  - релейно-контактные схемы, или релейные диаграммы (LD— Ladder Diagram)
  - диаграммы функциональных блоков (FBD— Function Block Diagram)
  - последовательные функциональные схемы (SFC — «Sequential Function Chart»)

Языки IL и ST являются текстовыми. Графическими языками являются LD, FBD, SFC.

На сегодняшний день лидирующие позиции на рынке языков стандарта МЭК систем программирования занимает универсальный комплекс **CoDeSys** немецкой компании 3S-Smart Software Solutions GmbH.

Также, исходя из представленной классификации, стоит отметить, что промышленные контроллеры могут содержать ввод-вывод или же быть без него. Примером контроллера без модулей ввода-вывода, например, является коммуникационный контроллер, который предназначен для выполнения функции межсетевого шлюза, или пример контроллера, который осуществляет сбор данных с промышленных контроллеров отдельных агрегатов уровня АСУ ТП.

### 9.3. РС-контроллеры

Компьютеры РС (рис. 9.9) со временем становились все более устойчивыми системами управления, являясь альтернативой для ПЛК, даже в тяжелых условиях среды. Персональные компьютеры с запущенным ядром реального времени или операционной системой реального времени могут обеспечить тот же уровень надежности, что и программируемые контроллеры. В промышленности программное обеспечение, запускаемое на компьютерах РС, создано для применения в управлении производственными процессами, поэтому опасность «зависания» сведена к минимуму. Даже если это

произойдет, ядро реального времени защищено, и будет правильно работать без перерыва.



*Рис. 9.9. Промышленный ПК Siemens SIMATIC Panel PC*

**Первое и главное преимущество РС-контроллеров** связано с их открытостью, т.е. с возможностью применять в АСУ ТП самое современное оборудование, только-только появившееся на мировом рынке, причем оборудование для РС-контроллеров сейчас выпускают уже не десятки, а сотни производителей. Пользователь может применять в своих системах продукцию разных фирм, а не находится во власти одного производителя (как в случае с ПЛК)

**Второе преимущество РС-контроллеров** заключается в том, что в силу их родственности с компьютерами верхнего уровня не требуется дополнительные затраты на подготовку профессионалов, обеспечивающих эксплуатацию таких контроллеров. Эту работу могут сделать специалисты, обеспечивающие эксплуатацию компьютеров верхнего уровня, что сокращает сроки внедрения СУ и упрощает сроки их эксплуатации, т.е. затрат.

**Более высокая надежность – 3 преимущество.** Обычно рассматривают физическую и программную надежность контроллеров. При этом под физической надежностью понимается способность аппаратуры устойчиво функционировать в условиях окружающей среды промышленного цеха и противостоять ее вредному воздействию, а под программной надежностью понимается способность ПО устойчиво функционировать при возникновении ситуаций, требующих реакции в заданное время. Физическая надежность ПЛК и РС контроллеров одинаковая. РС контроллеры ориентированы на работу в тяжелых условиях: диапазон температур, пыль, влага, удары, вибрация и электромагнитные излучения. РС контроллеры иначе называются **Softlogic-контроллерами**.

Пример РС-контроллер visiGRAF-320SX – это устройство, работающее под управлением компактного процессорного модуля с низким

энергопотреблением, который по архитектуре совместим с компьютером IBM PC на базе процессора DM&P Vortex86SX 300MHz.

Операционная система PC-контроллеров должна удовлетворять требованиям открытости. Специфика условий работы контроллеров требует, чтобы ОС поддерживала работу в режиме реального времени, была компактна и имела возможность запуска из ПЗУ или флэш-памяти.

Для PC-контроллеров лучше всего подходит операционная система QNX (фирма QSSL Канада).

### **Вопросы к главе 9**

1. Микропроцессоры. Их классификация.
2. Характеристики микропроцессоров. Структура микропроцессора
3. Режимы работы микропроцессорной системы
4. Программируемый логический контроллер.
5. Классификация программируемых логических контроллеров.
6. PC-контроллеры

## **Глава 10. Элементы гидропневмоавтоматики**

### **10.1. Общие сведения о гидропневмоавтоматике**

**ГИДРОПНЕВМОАВТОМАТИКА** - область автоматике, предметом которой является разработка методов и технических средств, предназначенных для преобразования различных видов энергии в энергию жидкости или газа и приведения в действие различных устройств посредством рабочей жидкости или газа.

Устройства гидропневмоавтоматики используются для сбора информации (датчики с пневматическим или гидравлическим выходом, конечные и путевые выключатели и др.), её преобразования и хранения (гидро- и пневморегуляторы, оптимизаторы, вычислительные аналоговые устройства, релейные системы), представления информации (показывающие и регистрирующие устройства, индикаторы) и преобразования её в управляющие воздействия (исполнительные устройства).

Системы гидропневмоавтоматики используются для работы в условиях низких температур, высокой влажности и запылённости, больших ускорений, при наличии ударных и вибрационных нагрузок, радиации, электромагнитных полей и пр., когда др. виды приводов и систем управления использовать невозможно. Гидропневмосистемы применяются в авиационной и ракетной технике, в автомобильной, химической, газовой, нефтяной, металлургической промышленности, строительном производстве и др. Устройства

гидропневмоавтоматики считаются одними из наиболее надёжных средств автоматизации в системах управления, контроля различных процессов автоматических линий, станков с числовым программным управлением, автомобилей, судов, летательных аппаратов.

Элементы автоматики широко используются в пневмо-, электропневмо-, гидро-, электрогидро- приводах.

К основным преимуществам электропневмо-пневмоприводам относят:

- сжатый воздух, который является экономичной формой энергии, которая полностью безопасна для окружающей среды и здоровья человека;
- быстроедействие, которое очень важно при ситуациях, когда закрытие затвора должно происходить моментально, чтобы сохранить систему отопления в рабочем состоянии;
- хорошая управляемость (позволяют легко регулировать скорость вращения и расход воздуха);
- надёжность: электроприводы периодически при больших нагрузках выходят из строя, что совершенно электропневмо-, пневмо-приводам не грозит, так как они самостоятельно останавливаются или работают вхолостую;
- низкая стоимость;
- простота установки;
- нетребовательность к техническому обслуживанию;
- несложная система эксплуатации;
- ремонтпригодность;
- удобное управление;
- большой срок службы при соблюдении всех правил пользования.

Гидравлическим приводом (*гидроприводом*) называют устройство для приведения в движение механизмов и машин с помощью гидropередачи, системы гидроуправления и вспомогательных устройств. Под гидropередачей понимают устройство для передачи механической энергии за счёт гидростатического напора жидкости. Гидropередача обычно состоит из насоса и гидродвигателя, соединённых гидрoлиниями. Насос служит для перемещения жидкости в процессе преобразования приложенной к его валу механической энергии приводного двигателя в гидравлическую энергию потока жидкости, а гидродвигатель для преобразования энергии потока жидкости в механическую энергию ведомого вала.

По характеру движения выходного звена различают гидropередачи поступательного или вращательного движения. В первом случае в качестве гидродвигателя применяют гидравлический цилиндр, во втором - гидромотор. На экскаваторе гидropередачи приводов поворота стрелы, рукояти и ковша -

поступательного движения, а вращения платформы и передвижения - вращательного.

Гидропередача, в которой возможно изменение соотношения скоростей ведущего и ведомого звеньев, называется регулируемой, а не удовлетворяющая этому определению - нерегулируемой. Все определения гидропередачи при рассмотрении всего гидропривода переносятся и на определения гидропривода. Кроме того, гидропривод по способу управления регулирующим органом бывает ручным, гидравлическим, электрическим и др. В России имеются государственные стандарты на термины и определения, применяемые в гидроприводе. Некоторые из них, а именно те, которые нашли применение в гидроприводе экскаватора, указаны ниже.

- *Гидропривод* - это привод, в состав которого входит гидравлический механизм, рабочая среда которого находится под давлением, с одним или более объемными гидродвигателями. К устройствам гидропривода относят объемные гидромашины, гидроаппараты, кондиционеры рабочей среды, гидроемкость и гидролинии.
- *Объемный насос* - насос, в котором рабочая жидкость перемещается путем периодического изменения объема занимаемой ею камеры, попеременно сообщаемой со входом и выходом насоса.
- *Объемный гидродвигатель* - объемная гидромашина, предназначенная для преобразования энергии потока рабочей жидкости в энергию выходного звена.
- *Всасывающая гидролиния* - гидролиния, по которой рабочая жидкость движется из гидробака к насосу.
- *Напорная гидролиния* - гидролиния, по которой рабочая жидкость под давлением движется от насоса к гидроаппаратам.
- *Исполнительная гидролиния* - гидролиния, по которой рабочая жидкость движется от направляющего гидроаппарата к объемному гидродвигателю и обратно.
- *Гидролиния управления* - гидролиния, по которой рабочая жидкость движется к устройствам гидропривода для управления ими.

*Основными параметрами гидропривода являются:*

- *номинальное давление* - наибольшее давление, при котором гидрооборудование должно работать в течение установленного ресурса с сохранением параметров в пределах установленных норм;
- *максимальное давление* - наибольшее давление, допускаемое в работе гидрооборудования, ограниченное настройкой предохранительного устройства;
- *номинальный расход* - расход жидкости определенной вязкости через устройство при установленной потере давления.

Принцип действия гидропривода основан на высоком модуле упругости (ничтожной сжимаемости) жидкости и на законе Паскаля, гласящем, что всякое изменение давления в какой-либо точке покоящейся жидкости, не нарушающее ее равновесия, передается в другие точки без изменения.

Для нахождения основных кинематических и силовых зависимостей гидропривода рассмотрим расчетную схему гидропередачи, являющуюся основой гидропривода. Один из цилиндров гидропередачи является объемным насосом, а другой - объемным гидродвигателем. Оба цилиндра соединены между собой герметичной гидролинией. Высокий модуль упругости рабочей жидкости, находящейся в объемном насосе, объемном гидродвигателе и соединяющей гидролинии, обеспечивает практически жесткую связь между насосом и гидродвигателем. Объемный насос здесь выступает в роли преобразователя механической энергии в энергию давления рабочей жидкости, а объемный гидродвигатель - преобразователя энергии давления рабочей жидкости в механическую энергию. Рабочая жидкость устанавливает геометрическую связь между объемными гидромашинами.

Все потери мощности в гидроприводе превращаются в теплоту, которая должна отводиться естественным образом (через стенки труб и агрегатов) и специальными средствами (маслоохладителями). Приведенные зависимости будут справедливы и тогда, когда в качестве насоса использовать гидродвигатель, а в качестве двигателя - насос, т. е. рассмотренная система является обратимой. Обратимость важна для гидропередач вращательного движения, в которых в качестве насоса и двигателя можно применять конструктивно одинаковые агрегаты.

Под системой гидроуправления понимают гидравлическую систему, обеспечивающую управление гидропередачей. Она состоит из насосно-аккумуляторной части, колонок управления и функциональных золотниково-клапанных устройств.

Система гидроуправления обеспечивает:

- снижение усилий на ручках управления;
- простоту подвода управляющего сигнала к расположенному в любом месте агрегату;
- введение автоматических функциональных связей работы гидропередачи.

К вспомогательным устройствам относят агрегаты очистки, охлаждения и емкости рабочей жидкости.

### **Основные преимущества гидроприводов**

1. Высокая удельная мощность гидропривода, т.е. передаваемая мощность, приходящаяся на единицу суммарного веса элементов. Этот параметр у гидравлических приводов в 3...5 раз выше, чем у электрических, причем данное преимущество возрастает с ростом передаваемой мощности.

2. Относительно просто обеспечивается возможность бесступенчатого регулирования скорости выходного звена гидропривода в широком диапазоне.
3. Высокое быстродействие гидропривода. Операции пуска, реверса и останова выполняются гидроприводом значительно быстрее, чем другими приводами. Это обусловлено малым моментом инерции исполнительного органа гидродвигателя (момент инерции вращающихся частей гидромотора в 5... 10 раз меньше соответствующего момента инерции электродвигателя).
4. Высокий коэффициент усиления гидроусилителей по мощности.
5. Сравнительная простота осуществления технологических операций при заданном режиме, а также возможность простого и надежного предохранения приводящего двигателя и элементов гидропривода от перегрузок.
6. Простота преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное.
7. Свобода компоновки агрегатов гидропривода.
8. К гидравлическому приводу можно подключать любое гидравлическое оборудование: отбойные молотки, дисковые пилы, различные ковши и захваты.
9. Слабое воздействие вибрации на руки.

#### **Основные недостатки гидропривода**

1. Сравнительно невысокий КПД гидропривода и большие потери энергии при ее передаче на большие расстояния.
2. Зависимость характеристик гидропривода от условий эксплуатации (температура, давление). От температуры зависит вязкость рабочей жидкости, а низкое давление может стать причиной возникновения кавитации в гидросистеме или выделения из жидкости растворенных газов.
3. Чувствительность к загрязнению рабочей жидкости и необходимость достаточно высокой культуры обслуживания. Загрязнение рабочей жидкости абразивными частицами приводит к быстрому износу элементов прецизионных пар в гидравлических агрегатах и выходу их из строя.
4. Снижение КПД и ухудшение характеристик гидропривода по мере выработки им или его элементами эксплуатационного ресурса. Прежде всего происходит износ прецизионных пар, что приводит к увеличению зазоров в них и возрастанию утечек жидкости, т.е. снижению объемного КПД.

#### **10.2. Элементная база пневмо-, гидроприводов. Условные обозначения.**

## Трубопроводы

Трубопроводы (рис. 10.1) на гидравлических схемах показываются сплошными линиями, соединяющими элементы. Линии управления обычно показывают пунктирной линией. Направления движения жидкости, при необходимости, могут быть обозначены стрелками. Часто на гидросхемах обозначают линии - буква Р обозначает линию давления, Т - слива, Х - управления, I - дренажа.

Соединение линий показывают точкой, а если линии пересекаются на схеме, но не соединены, место пересечения обозначают дугой.

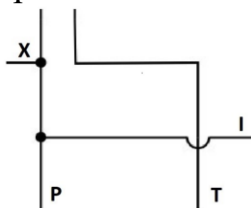


Рис.10.1. Трубопроводы

## Бак

Бак в гидравлике - важный элемент, являющийся хранилищем гидравлической жидкости. Бак, соединенный с атмосферой показан на рис.10.2.



Рис.10.2. Бак, соединенный с атмосферой

Закрытый бак, или емкость, например гидроаккумулятор (рис.10.3).

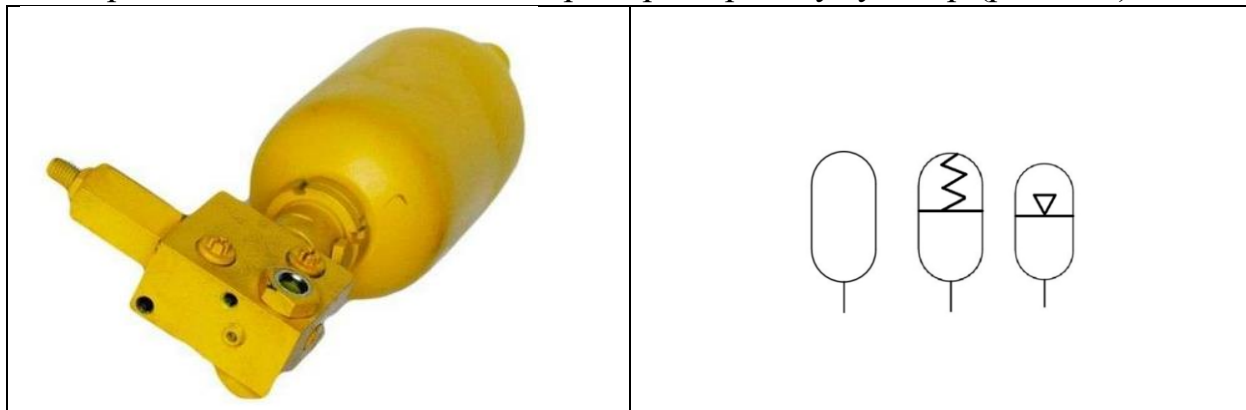


Рис.10.3. Конструкционный вид пневмогидроаккумулятора и УГО обозначения закрытого бака, пружинного гидроаккумулятора и пневмоаккумулятора

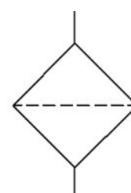


*Рис.10.4. Конструкционный вид фильтра и УГО обозначение*

## Насос

Центробежные насосы, обычно изображают в виде окружности, в центр которой подведена линия всасывания, а к периметру окружности линия нагнетания (рис.10.5):

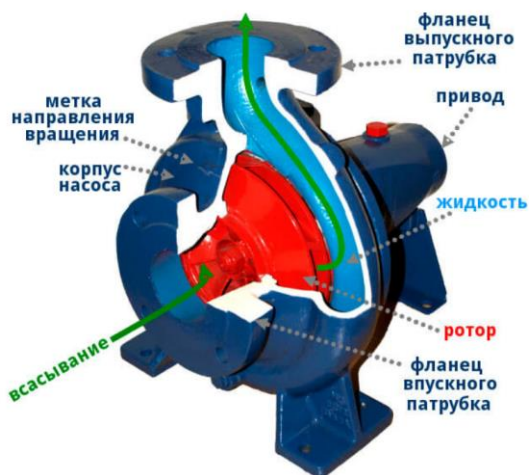


*Рис.10.5. Конструкционный вид центробежного насоса и УГО обозначение*

**Объемные** (шестеренные, поршневые, пластинчатые и т.д) **насосы**, с треугольником-стрелкой, обозначающим направление потока жидкости (рис.10.6).



*Рис.10.6. Конструкционный вид шестеренного насоса и УГО обозначение*

Насос обратимый - может качать жидкость в обоих направлениях (рис. 10.7).

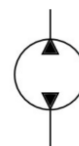


*Рис.10.7. Конструкционный вид пластинчатого реверсивного насоса и УГО обозначен*

Насос регулируемый, например, с изменяемым объемом рабочей камеры (рис. 10.8).

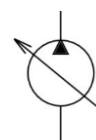


*Рис.10.8. Конструкционный вид регулируемого насоса и УГО обозначение*

### **Гидромотор**

В данном случае стрелка показывает направление подвода жидкости в гидромотор (рис. 10.9).



*Рис.10.9. Конструкционный вид гидромотора и УГО обозначение*

Для обозначения гидромотора действую те же правила, что и для обозначения насоса: обратимость показывается двумя треугольными стрелками, возможность регулирования диагональной стрелой.

**Регулируемый обратимый насос-мотор (рис. 10.10).**



*Рис.10.10. Конструкционный вид обратимого насоса и УГО обозначение*

### **Гидравлический цилиндр**

Гидроцилиндр - один из самых распространенных гидравлических двигателей, который можно прочесть практически на любой гидросхеме. Цилиндр двухстороннего действия имеет подводы в поршневую и штоковую полость (Рис.10.11.)

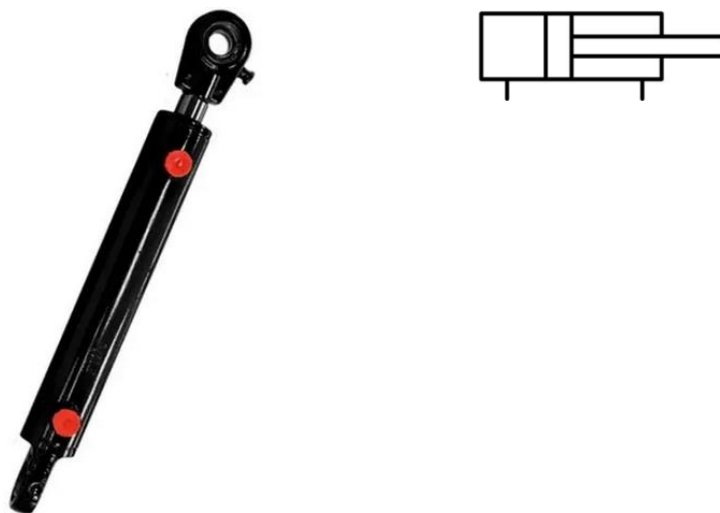


*Рис.10.10. Конструкционный вид цилиндра двухстороннего действия и УГО обозначение*

Плунжерный гидроцилиндр (рис.10.11).

Гидроцилиндры плунжерного типа отличаются особенностью конструкции: вместо связки шток-поршень используется только шток, который выполняет функцию плунжера. Все плунжерные гидроцилиндры — одностороннего действия.



*Рис.10.11. Конструкционный вид цилиндра двухстороннего действия и УГО обозначение*

Телескопический гидроцилиндр (рис.10.12)

**Телескопические гидроцилиндры** по конструкции состоят из нескольких секций. Каждая из них является своего рода поршнем и выступает в качестве корпуса для внутренней секции. Принцип работы такого гидроцилиндра:

- при подаче давления в систему начинается движение первого поршня с наибольшим диаметром до упора;
- далее выдвигается следующий поршень, находящийся внутри первого (первый при этом становится цилиндром для второго);
- аналогично происходит движение каждой секции **телескопического гидроцилиндра** — до выдвижения всех секций или достижения необходимого уровня.

Давление в системе при этом должно изменяться, так как различно усилие при выдвижении каждой последующей части. Количество цилиндров в

одном устройстве — от 2 до 6. В сложенном положении **гидроцилиндр телескопирования** составляет от 20 до 40 процентов от его длины в развёрнутом состоянии.

Все гидроцилиндры такой конструкции подразделяются на 2 основных типа:

- **Гидроцилиндр телескопический** одностороннего действия. Принцип работы заключается в том, что давление в систему подаётся только при выдвигании поршней и изменяется при начале движения каждого последующего. Обратное движение происходит, как правило, за счёт силы тяжести.
- **Гидроцилиндр телескопический** двухстороннего действия. Особенность его состоит в том, что давление подаётся в штоковую полость при движении в обоих направлениях. Для обеспечения подачи рабочей жидкости при обратном движении поршней такие гидроцилиндры имеют более сложную конструкцию.



*Рис.10.12. Конструкционный вид телескопического цилиндра двухстороннего действия и УГО обозначение*

### **Распределитель**

Гидравлический распределитель (гидрораспределитель) — устройство, предназначенное для управления гидравлическими потоками в гидросистеме с помощью внешнего воздействия (сигнала).

Распределитель на гидросхеме показывается набором, квадратных окон, каждое из которых соответствует определённому положению золотника (позиции). Если распределитель двухпозиционный, значит на схеме он будет состоять из двух квадратных окон, трехпозиционный - из трех. Внутри каждого окна показано как соединяются линии в данном положении (рис.10.13).

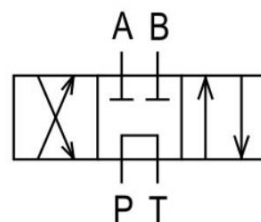


*Рис.10.13. Конструкционный вид распределителя с ручным управлением и УГО обозначение*

На рисунке показан четырех линейный (к распределителю подведено четыре линии А, В, Р, Т), трехпозиционный (три окна) распределитель. На схеме показано нейтральное положение золотника распределителя, в данном случае он находится в центральном положении (линии подведены к центральному окну). Также, на схеме видно, как соединены гидравлические линии между собой, в рассматриваемом примере в нейтральном положении линии Р и Т соединены между собой, А и В - заглушены.

Для того, чтобы управлять элементом, например распределителем, нужно каким-либо образом оказать на него воздействие. Ниже показаны условные обозначения: ручного, механического, гидравлического, пневматического, электромагнитного управления и пружинного возврата. Эти элементы могут компоноваться различным образом (рис.10.15).



*Рис.10.15. Условные обозначения: ручного, механического, гидравлического, пневматического, электромагнитного управления и пружинного возврата.*

На следующем рисунке показан четырех линейный, двухпозиционный распределитель, с электромагнитным управлением и пружинным возвратом (рис.10.16).

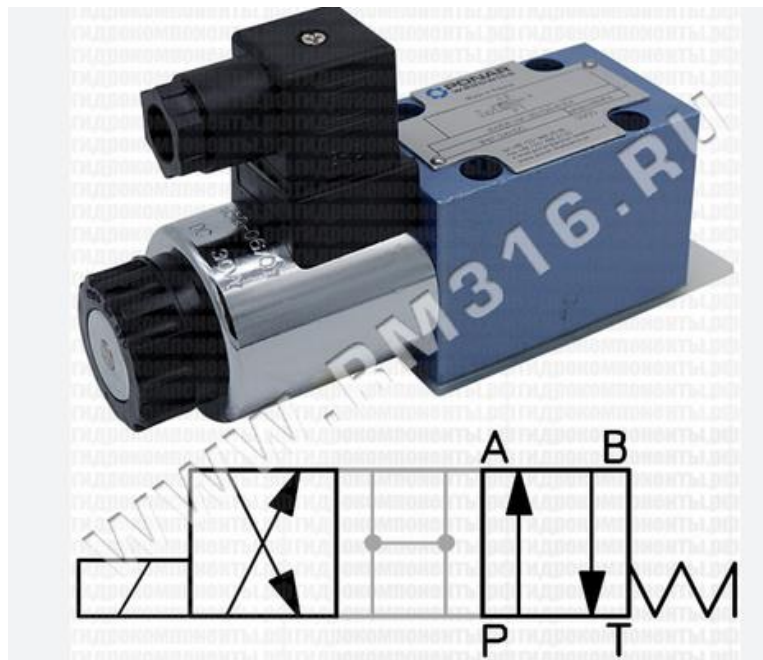


*Рис.10.16. Конструкционный вид двухпозиционного четырехлинейного распределителя с промежуточным положением (все линии соединены) и УГО обозначение*

## **Клапан**

Клапаны в гидравлике, обычно показываются квадратом, в котором условно показано поведение элементов при воздействии.

### **Предохранительный клапан**

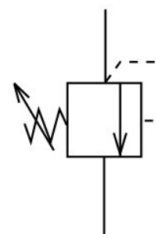


*Рис.10.17. Конструкционный вид предохранительного клапана и УГО обозначение*

На рисунке 10.17. показано условное обозначение предохранительного клапана. На схеме видно, что как только давление в линии управления

(показана пунктиром) превысит настройку регулируемой пружины - стрелка сместиться в бок, и клапан откроется.

### **Редукционный клапан (рис.10.18)**

Управляющим давлением в таких клапанах является давление в отводимой линии (на выходе редукционного клапана). Редукционным называют клапан, предназначенный для уменьшения давления в линии отводимой от основной и поддержания этого давления на постоянном уровне.

Пример обозначения редукционного клапана показан на следующем рисунке.



*Рис.10.18. Конструкционный вид редукционного клапана и УГО обозначение*  
**Обратный клапан (рис.10.19)**



*Рис.10.19. Конструкционный вид и УГО обратного клапана*

Назначение обратного клапана - пропускать жидкость в одном направлении, и перекрывать ее движение в другом. При течении сверху вниз шарик (круг) отойдет от седла, обозначенного двумя линиями. А при подаче жидкости снизу - вверх шарик к седлу прижмется, и не допустит течения жидкости в этом направлении.

Часто на схемах обратного клапана изображают пружину под шариком, обеспечивающую предварительное поджатие.

### **Дроссель (рис.10.20)**

Дроссель - регулируемое гидравлическое сопротивление.

Гидравлическое сопротивление или нерегулируемый дроссель на схемах изображают двумя изогнутыми линиями. Возможность регулирования, как обычно, показывается добавлением стрелки, поэтому регулируемый дроссель будет обозначаться следующим образом:



*Рис.10.20. Конструкционный вид двунаправленного дросселя и УГО обозначение*

### Устройства измерения

В гидравлике наиболее часто используются следующие измерительные приборы: манометр, расходомер, указатель уровня, обозначение этих приборов показано ниже (рис.10.21).

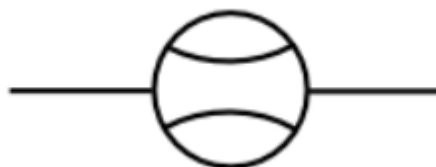


Манометр



Указатель уровня

Указатель уровня поплавковый



Расходомер

*Рис.10.21. Конструкционные виды измерительных приборов и их УГО обозначение*

### Реле давления (10.22)

Данное устройство осуществляет переключение контакта при достижении определенного уровня давления. Этот уровень определяется настройкой пружины.

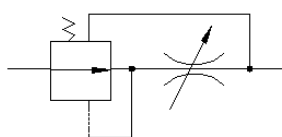


*Рис.10.22. Конструкционный виды реле давления с точной регулировкой давления и его УГО*

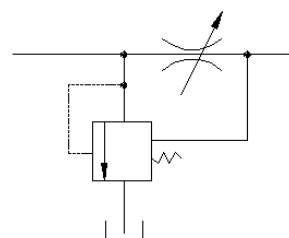
Гидравлическая линия подводится к закрашенному треугольнику.

Переключающий контакт и настраиваемая пружина, также присутствуют на схеме.

**Регулятор потока** (рис.10.23) представляет собой комбинацию гидродросселя и редуциционного гидроклапана, который поддерживает постоянный перепад давления на дросселирующей щели, благодаря чему поток масла, проходящего через гидродроссель, не зависит от давления на входе и выходе из него. Регуляторы расхода поддерживают заданный расход рабочей жидкости в независимости от изменения нагрузки.



а) на основе  
редуциционного  
клапана

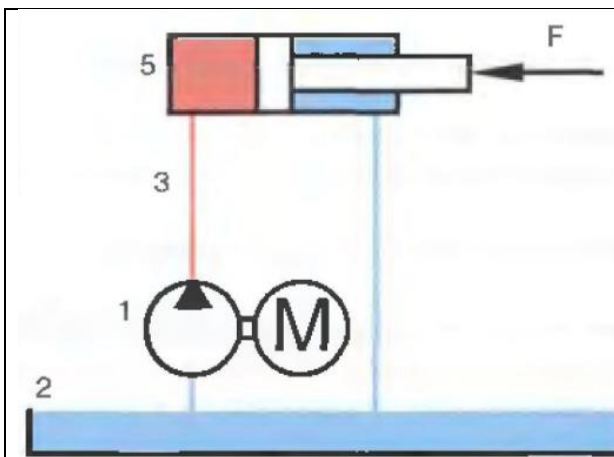


б) на основе  
переливного клапана и  
дросселя

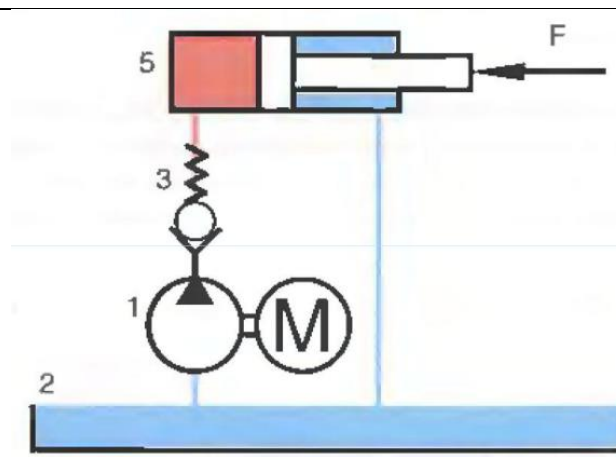
*Рис.10.23. Конструкционный виды реле давления с точной регулировкой давления и его УГО*

В таблице 10.1 приведены простейшие гидравлические схемы

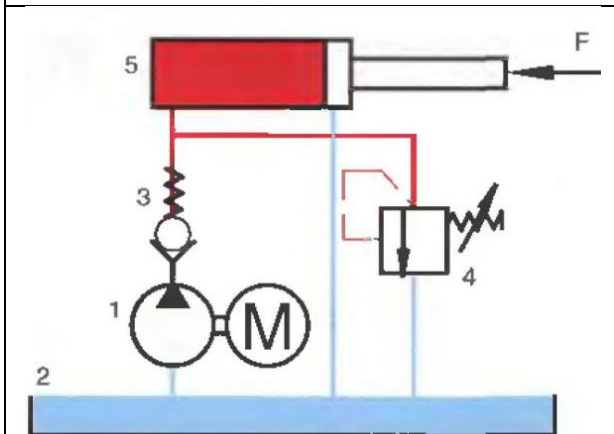
*Таблица 10.1. Простейшие гидравлические передачи*



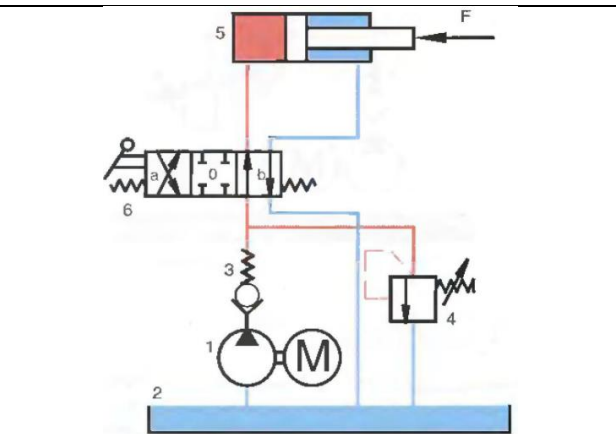
1- Насос; 2- Бак; 3- Трубопровод; 5- Гидроцилиндр



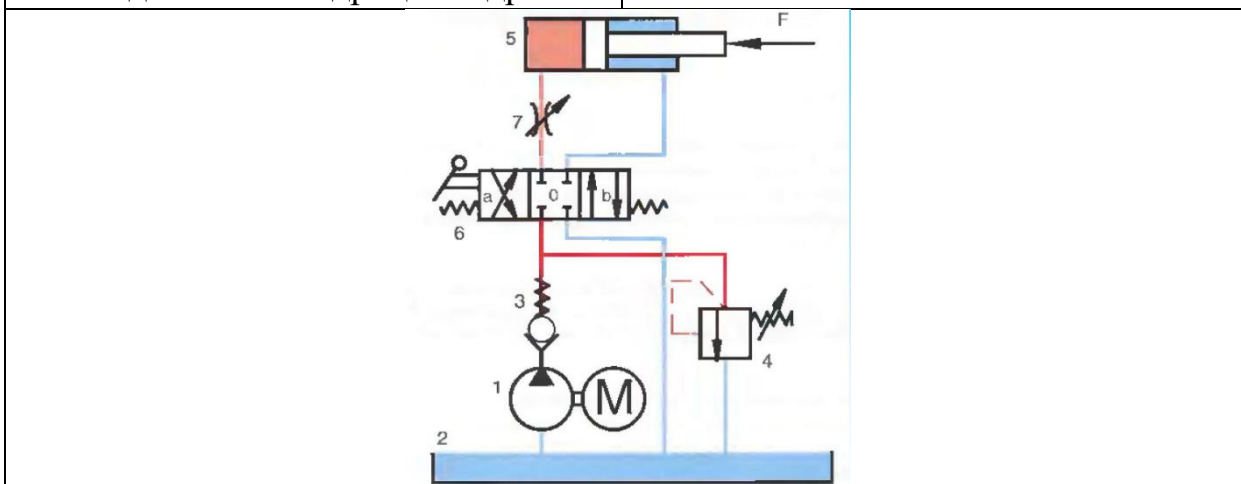
3- Обратный клапан, служит для фиксации поршня гидроцилиндра при отключении насоса



4- Предохранительный клапан, защищает гидропривод от чрезмерного нарастания давления при полном выдвижении гидроцилиндра



6 – Гидрораспределитель -служит для управления направлением движения поршня



7 – Дроссель -служит для изменения скорости перемещения поршня в гидроцилиндре

## Вопросы к главе 10

1. Общие сведения о гидропневмоавтоматике
2. Назовите преимущества и недостатки гидроприводов
3. Элементная база пневмо-, гидроприводов. Условные обозначения
4. Приведите простейшие гидравлические схемы

## Глава 11. Датчики параметров технологического процесса

### 11.1. Характеристики датчиков

В технологических процессах управление осуществляется по таким параметрам как время, энергия, температура, сила (давление), масса, скорость (ускорение), электропроводность, освещенность, цвет и т.д. Многие остальные параметры технологических процессов могут быть рассчитаны, смоделированы из вышеперечисленных.

*Датчик* - конструктивно законченное устройство, предназначенное для преобразования физической величины в электрическую или иную величину, удобную для дальнейшей передачи и преобразования. Большинство известных в автоматике датчиков преобразуют контролируемую величину  $X$  в электрическую величину  $Y$  (например, движение в индуктивность или напряжение, температуру в электрическое напряжение и т. п.) или в неэлектрическую (движение в давление воздуха или жидкости и др.). Измерения производят путем внедрения датчика 6 в среду 1 или приема излучений (электромагнитных, акустических и др.) из нее (рис. 11.1). Основу датчика составляет *чувствительный элемент* 2, непосредственно преобразующий измеряемую величину среды 1 в электрический сигнал. В состав датчика могут входить также устройства 3, изменяющие форму или корректирующие сигнал чувствительного элемента, например, преобразователь аналогового сигнала в цифровой или корректор нелинейности. Сигнал из датчика подают по проводам или по беспроводной системе 4 на приемник 5 его обработки и дальнейшего использования.

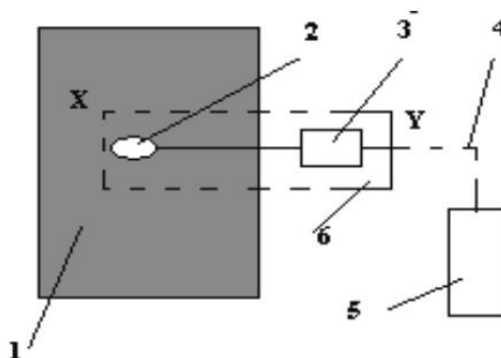


Рис. 11.1 – Система: датчик и измеряемая среда

Датчики классифицируют по различным признакам, но, прежде всего по виду измеряемого параметра среды и принципу действия. При заказе датчика у изготовителя оперируют, прежде всего, видом измеряемого параметра: температура, давление, скорость, плотность и т.д. По роду энергии выходной величины различают электрические и неэлектрические датчики, в частности механические, пневматические или гидравлические. В практике находят разные виды датчиков, но все большее и большее применение находят электрические и построенные на их основе электронные датчики, в силу своей универсальности применения независимо от оборудования, на которое они устанавливаются, и технологичности изготовления. Принцип действия датчика оказывает существенное влияние на его выбор, если имеются требования по габаритным размерам, погрешности или безопасности работы автоматической системы. В современных системах автоматики датчики подразделяют также по виду выходной величины - аналоговая или цифровая. Традиционно использовалось аналоговое представление информации. Однако, в связи с повышением требований к точности передачи информации датчиков на большое расстояние (от оборудования до места обработки информации), применением компьютерного ее анализа и последующего использования, цифровые датчики находят все большее и большее применение. Понятие датчика связано с такими характеристиками как *диапазон измерений, статическая характеристика, точность измерений, чувствительность, разрешающая способность, время успокоения и быстроедействие, выходная мощность и выходное сопротивление.*

*Диапазон измерений* – разница между минимальной измеряемой величиной и максимальной.

*Диапазон выходных значений* – алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальной и минимальной величине внешнего воздействия. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции.

*Гистерезис* – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании. Типичной причиной возникновения гистерезиса является трение и структурные особенности или изменения материалов.

*Воспроизводимость* – это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты.

*Статическая характеристика* – зависимость выходной величины  $Y$  от входной величины  $X$  –  $Y=f(X)$  (рис.11.2).

*Чувствительность* – отношение изменения показаний датчика  $dY$  к изменению измеряемой величины  $dX$ :

$$\eta = dY/dX$$

*Мертвая зона* – это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов. В пределах этой зоны выходной сигнал датчика остается практически постоянным, часто равным нулю.

*Выходной импеданс*  $Z_{вых}$  является характеристикой, указывающей, насколько легко датчик согласовывается с последующей электронной схемой. Если выходным сигналом датчика является напряжение, то сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключают параллельно входному сопротивлению (импедансу) электронной схемы  $Z_{вх}$ . Если же выходным сигналом датчика является электрический ток, то сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключают последовательно входному сопротивлению (импедансу) электронной схемы  $Z_{вх}$  (рис. 11.3). Обычно входной и выходной импеданс представляют в комплексном виде, поскольку они включают в себя и активные и реактивные компоненты. Для минимизации искажений выходного сигнала датчик с токовым выходом должен иметь максимально возможный выходной, а его интерфейсная схема – минимальный входной импеданс. В случае потенциального соединения (выходной сигнал датчика – напряжение) датчик должен иметь низкий выходной импеданс, а его интерфейсная схема – высокий входной

Одной из характеристик датчиков является *нелинейность* его статической характеристики. Для датчиков с линейной статической характеристикой (рис.11.2, зависимость 1) чувствительность постоянна. Для датчиков с нелинейной характеристикой (рис.11.2, зависимость 2) чувствительность непостоянна, что вызывает определенные трудности использования датчика в зависимости от диапазона измеряемой величины. Поэтому применяют различные способы линеализации выходного сигнала датчиков. Линейная зависимость  $Y=f(X)$  упрощает использование и обработку сигналов, снижает погрешности. *Точность измерений*. Точность измерений определяется погрешностью. Различают *абсолютную погрешность* – разность между показанием датчика  $X_d$  и истинным значением измеряемой величины  $X_0$ :

$$\Delta X = X_d - X_0$$

и *относительную погрешность* – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины

$$\delta = \Delta X / X_0.$$

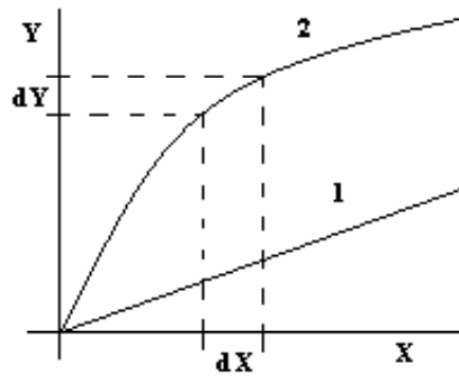


Рис. 11.2 – Нелинейность датчиков

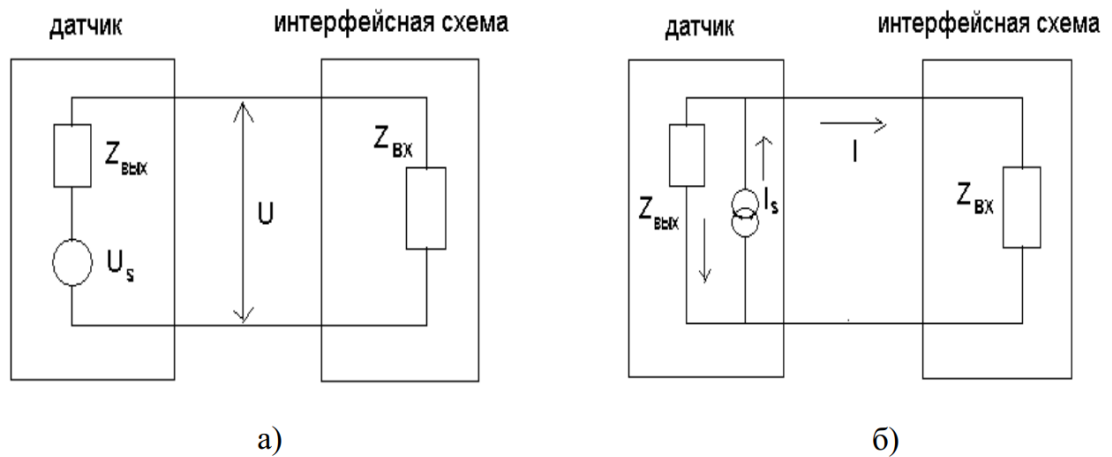


Рис. 11. 3. Соединение датчика с интерфейсной схемой: а) датчик с выходным сигналом в виде напряжения, б) датчик с токовым выходом

*Приведенная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, например, к максимальному значению измеряемой величины  $X_m$

$$\gamma = \Delta X / X_m.$$

*Основная погрешность* – погрешность в нормальных условиях эксплуатации (температура, влажность, атмосферное давление и т.п.).

*Дополнительная погрешность* – погрешность, вызванная отклонением условий измерений (эксплуатации) от нормальных, на которые рассчитан датчик по техническому паспорту.

*Разрешающая способность* – минимальная разность измеряемой величины, различаемая с помощью датчика.

*Время установления показаний (время успокоения)* – время, в течение которого при одной и той же входной измеряемой величине показания датчика примут постоянное значение.

*Быстродействие* – максимальное количество измерений с нормированной погрешностью в единицу времени измерения. Выходная мощность сигнала и

выходное сопротивление датчика должны соответствовать приемнику информации.

*Частота среза* характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает, насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя – с каким самым медленным сигналом он может работать.

*Фазовый сдвиг* на определенной частоте показывает, насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия. Фазовый сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами.

*Время разогрева* также является одной из динамических характеристик датчиков. Это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений.

*Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф)* – характеристики точности датчиков, описывающие изменения рабочих характеристик датчиков в течение коротких (минуты, часы, дни) или длинных (до нескольких лет) промежутков времени.

*Температура окружающей среды* влияет на рабочие характеристики датчиков. Рабочий диапазон температур – это интервал окружающих температур, внутри которого датчик работает с заданной точностью.

## 11.2. Чувствительные элементы датчиков

*Чувствительные элементы* датчиков по принципу действия подразделяются на *параметрические*, в которых измеряемая величина воздействует на параметры чувствительного элемента (сопротивление  $R$ , емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и т.д.), и *генераторные*, преобразующие неэлектрические величины в электрическую величину (напряжение, ток). Для работы параметрического датчика необходим внешний источник энергии. К параметрическим чувствительным элементам относятся – контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, терморезисторы, емкостные, индуктивные, фоторезисторные и др., к генераторным – термоэлектрические, индукционные, пьезоэлектрические, фотоэлементы и др. Для построения чувствительных элементов датчиков используют ряд физических явлений, которые могут в зависимости от условий давать информацию о том или ином параметре технологического процесса. Принципы построения чувствительных элементов датчиков рассмотрим по физической природе преобразования информации.

### 11.2.1 *Механические чувствительные элементы датчиков*

Наиболее простыми средствами получения информации о различных параметрах технологических процессов (положения деталей, тары, продукта на транспорте, уровня воды в емкости и др.) служат механические датчики — щупы, стержни, ползки, катки и т. п. Механический чувствительный элемент (щуп) связан, как правило, с преобразовательно - усилительным звеном и находится в состоянии силового замыкания с источником информации. Определенная силовая настройка щупа позволяет выделить полезный сигнал, например, появление тары на транспортере. На рис.11.4. показан пример механического датчика положения движущейся тары на транспортере. Датчик состоит из щупа 4 с противовесом 5, насаженного на ось вращения 10. В корпусе датчика имеется пара контактов 7 и 8 для включения внешней электрической цепи. Щуп имеет возможность при приближении банки 2 отклоняться на угол  $\alpha$ . До подхода банки 2 к позиции срабатывания датчика (рис.11.4а), определяемой осью 5, нижний конец щупа 4 под действием противовеса 5 опущен вертикально, параллельно этой оси. Контакты 7 разомкнуты, и во внешнюю цепь никакого сигнала не поступает. В момент прихода банки 2 к положению, определяемому осью 9 (рис.11.4б), щуп 4 начинает отклоняться и своим противоположным концом замыкает контакты 7 и 8, которые дают сигнал в цепь управления “одна банка ” прошла. Сигнал управления может представлять собой единичный электрический импульс, который считывается системой управления и используется для подсчета количества банок, остановки транспортера, подачи ящиков и т.д. После прохода банки 2 щуп освобождается и под действием противовеса 5 опускается в положение 9, ожидая прихода следующей банки 3 и т.д.

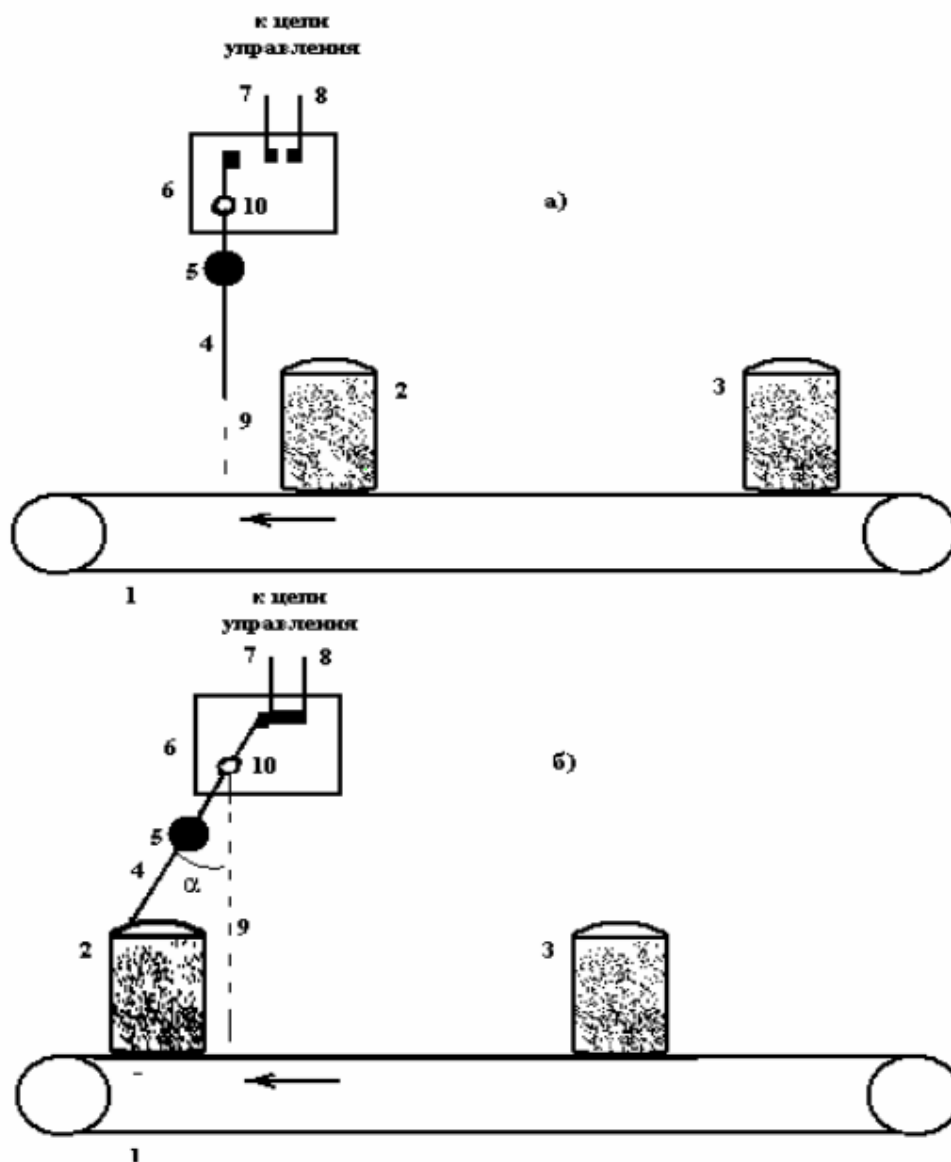


Рис. 11.4 – Датчик положения с механическим чувствительным элементом:

1- транспортер; 2, 3- движущиеся банки; 4- чувствительный элемент-щуп; 5- противовес; 6- корпус датчика; 7,8- электрические контакты; 9- ось нейтрального положения щупа; 10- ось вращения щупа; а) положение щупа до подхода банки; б) положение щупа после подхода банки.

Другим примером механического датчика является известный “поплавок” (рис.11.5) для определения уровня жидкости. В бак 1 поступает жидкость 2. Поплавок 4, соединенный рычагом 3 с контактной группой 6 и 7, заключенной в корпус 5.

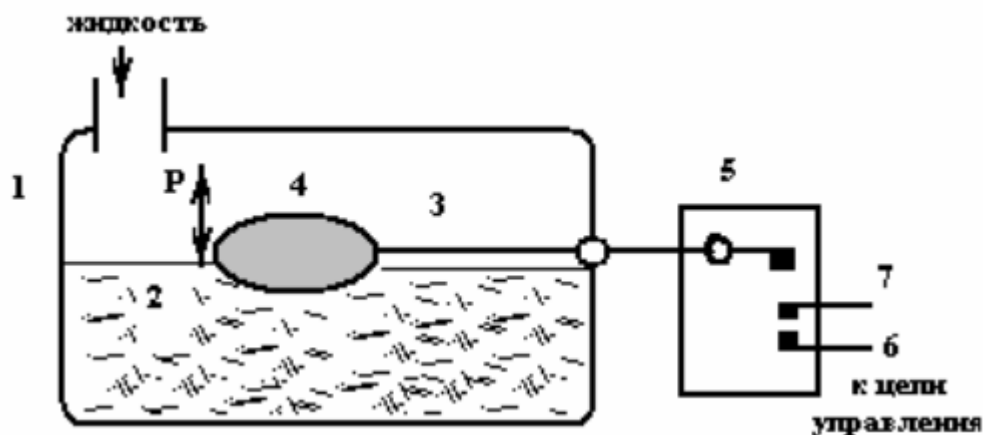


Рис. 11.5 – Механический датчик “поплавок” для отслеживания уровня жидкости в баке: 1- бак для жидкости; 2 – жидкость; 3- рычаг; 4- поплавок; 5- корпус контактной группы; 6- 7 – контактная группа.

При поступлении жидкости в бак 1 поплавок 4 поднимается вместе с ее уровнем. При достижении заданного уровня жидкости поплавок под действием выталкивающей его силы Р перемещает рычаг 3 вверх, который своим противоположным концом замыкает контактную группу 6-7, дающую сигнал управления, например, на прекращение подачи жидкости или ее откачки.

### 11.2.2 Потенциометрические чувствительные элементы

В датчиках, чувствительным элементом в которых является потенциометр – переменный резистор, подвижной контакт механически связан с устройством, параметр которого необходимо измерить. Потенциометрические устройства широко используются для преобразования линейного или углового перемещений (входная величина) в электрический сигнал (выходная величина). Конструктивно потенциометрическое измерительное устройство (рис. 11.6.) состоит из переменного резистора 1 с движком 2, к которому прикреплена жесткая механическая связь 3 с перемещаемым объектом 4. Потенциометр может быть выполнен линейным или круговым. В первом случае измеряются линейные перемещения, во втором - угловые. Обмотка резистора выполняется из металлической проволоки (константа, манганина, изабелина, никелина), навитой на каркас, или металлических пленок. На вход потенциометра подается напряжение  $U_1$ .

Объект, перемещение  $X$  которого необходимо измерить, через механическую связь перемещает движок потенциометра на то же расстояние  $X$  или кратное ему или на определенный угол, в зависимости от конструкции связи. Напряжение на выходе  $U_2$  определяется из выражения:

$$U_2 = U_1 R_x / R_n = U_1 X / L = kX,$$

где  $k = U_1 / L$  – постоянная датчика.

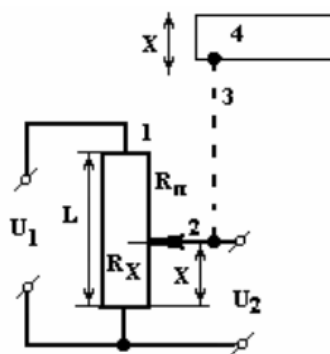


Рис. 11.6 – Потенциометрический чувствительный элемент: 1- потенциометр; 2- движок потенциометра; 3- жесткая связь; 4- перемещаемый объект;  $L$ -длина перемещения движка;  $X$ - перемещение объекта;  $R_n$ - полное сопротивление потенциометра;  $R_x$ - измеряемое сопротивление ползуна;  $U_1$ - входное напряжение;  $U_2$ - выходное напряжение датчика.

Потенциометрические датчики просты по конструкции, дешевы. Однако, в силу применения движущихся механических частей, имеют значительную погрешности и низкую надежность.

### 11.2.3 Тензочувствительные элементы

Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта – изменении величины активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений (усилий). В простейшем случае тензорезистор представляет собой тонкую проволоку, внедренную в бумагу, наклеиваемую на металлическую балку, которая подвергается механической деформации (растяжение, изгиб, скручивание, сжатие).

Полупроводниковый тензорезистор (рис. 11.7) представляет собой кристалл кремния (n-проводимость) 1 с нанесенной на его поверхность дорожкой другого полупроводника с p-проводимостью – тензорезиста 2. Сопротивление дорожки 2 тензорезистора равно  $R = \rho l/s$ , где  $\rho$ - удельное сопротивление материала тензорезиста;  $l$ - длина дорожки тензорезиста;  $s$ - площадь поперечного сечения тензорезиста.

При деформации дорожки под действием силы  $F$ , например, при ее сжатии, изменяется эффективная длина  $l$  (увеличивается) и площадь поперечного сечения  $s$  (уменьшается). В результате изменяется сопротивление подложки  $R$  (увеличивается), а значит и всего p-n перехода тензорезистора. Это изменение сопротивления фиксируется электронной схемой – таким образом, измеряется сила  $F$ .

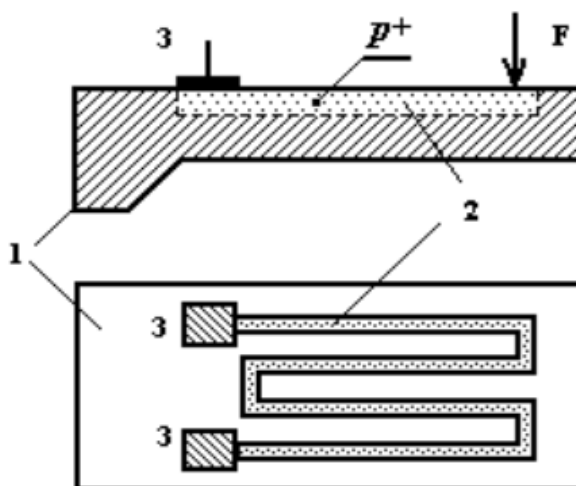


Рис. 11.7 – Тензорезистор: 1-полупроводниковый кристалл; 2- дорожка тензорезиста с p-проводимостью; 3- электроды.

Тензорезистор крепится к детали, которая воспринимает какие-либо усилия  $F$ . Чувствительность тензорезисторных преобразователей определяется тензорезисторным коэффициентом – отношением изменения сопротивления активной части тензорезистора к изменению приложенной силы. У большинства проволочных тензорезисторов  $K \sim 2$ , а у полупроводниковых –  $K \sim 100$ . Применяются тензорезисторы для измерения сил, деформаций и малых перемещений.

#### 11.2.4 Индуктивные чувствительные элементы

Принцип действия индуктивных чувствительных элементов датчиков основан на изменении тока в обмотке индуктивной катушки или трансформатора в зависимости от магнитного сопротивления сердечника.

На рис.11.8 приведен индуктивный чувствительный элемент, состоящий из обмотки катушки 1, намотанной на неподвижный сердечник 2, продолжением которого является подвижный сердечник 3. Между неподвижным и подвижным сердечниками имеется зазор  $\delta$ , который зависит от положения подвижного сердечника 3, связанного с объектом, для которого необходимо измерить перемещение  $X$ . На обмотку катушки подается переменное синусоидальное напряжение  $U_1$  с частотой  $f$ . В сердечнике с магнитным сопротивлением  $R_m$  циркулирует магнитный поток  $\Phi$ .

В цепи обмотки протекает ток, величина которого зависит от зазора  $\delta$ :

$$I = \delta \Phi (2\pi f / \mu_0 S) = k \delta \Phi,$$

где:  $k = 2\pi f / \mu_0 S$ - постоянная датчика;  $\mu_0$ - магнитная постоянная;

$S$ - площадь сечения сердечника

Выходной сигнал равен  $U_2 = ZI = k \delta \Phi$ .

Т.к. магнитный поток также зависит от зазора  $\delta$ , то зависимость тока от зазора является нелинейной, особенно в начале и в конце зависимости  $I=f(\delta)$ . Для повышения чувствительности применяют дифференциальное включение двух обмоток в мост. Широко используется трансформаторная схема включения,

когда одна из обмоток питается внешним напряжением, а во второй наводится напряжение в зависимости от магнитного сопротивления, т.е. зазора между сердечниками. Индуктивные датчики широко применяются для измерения малых перемещений и вибраций 0,1—0,5 мкм.

### 11.2.5 Индукционные чувствительные элементы

Индукционные преобразователи подразделяются на два типа: с катушкой, имеющей ферромагнитную деталь, перемещающуюся относительно неподвижной катушки (рис.9.8а) и перемещающуюся (вращающуюся) относительно постоянного магнита (рис. 9.8б).

Индукционный датчик с катушкой 1, намотанной на сердечник 2, и перемещающейся ферромагнитной деталью 3 изображен на рис.11.8а. Ферромагнитная деталь 3 механически связана с перемещающейся деталью 4 (вращающимся со скоростью  $\omega$  валом). В этом случае катушка 1 периодически пронизывается переменным магнитным потоком  $\Phi$ , в результате чего в ней возникнет электродвижущая сила:  $e(t) = -\Psi d\Phi/dt$ , где  $\Psi$  - коэффициент потокосцепления индукционного датчика;  $t$  - время. При вращении вала 4 на выходе катушки возникают импульсы напряжения. Период возникновения импульсов точно соответствует частоте вращения вала  $f = \omega/2\pi$ :  $T = 1/f = 2\pi/\omega$ . Частота появления импульсов  $f$  равна частоте вращения вала. Для подсчета этой частоты применяют счетчики импульсов.

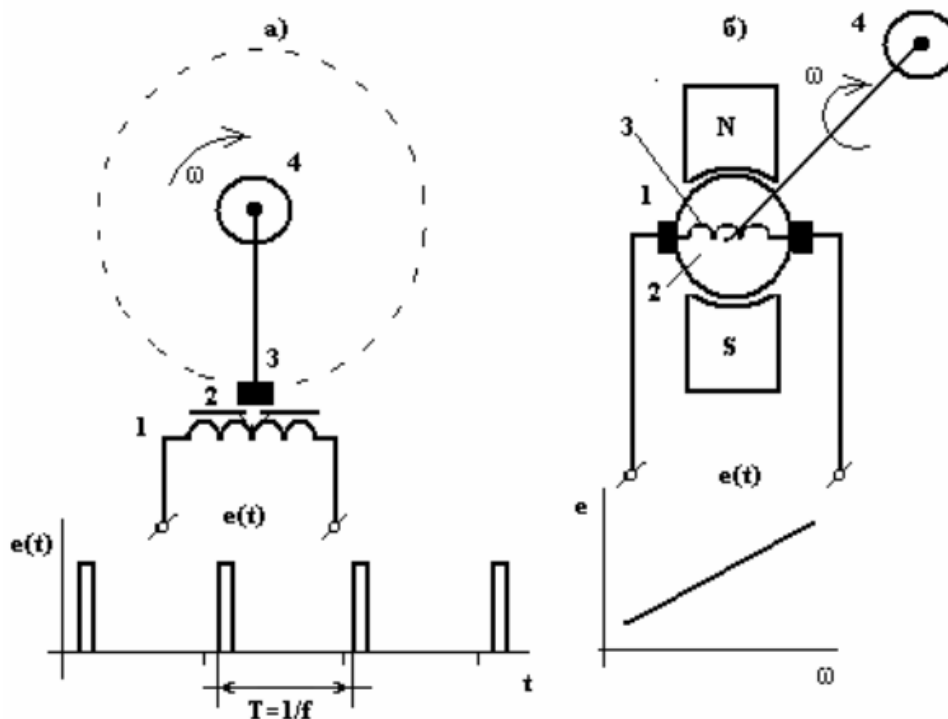


*Рис. 11.8 – Индукционные чувствительные элементы: а - с перемещающейся ферромагнитной деталью; б - тахогенератор.*

К индукционным устройствам относятся тахогенераторы (рис.11.8б), которые представляют собой миниатюрные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов или дополнительных обмоток возбуждения. Магнитное поле создается постоянными магнитами N-S. Якорь 2 тахогенератора содержит катушку 3, вращающуюся от вала 3 со скоростью  $\omega$ . Выходное напряжение снимается со щеток 1. Для большинства индукционных преобразователей статическая характеристика является линейной (погрешности составляют 0,5 ... 1,5%) - выходное напряжение пропорционально скорости вращения вала.

### 11.2.6 Емкостные чувствительные элементы

Емкостные датчики (рис.11.9.) представляют собой конденсаторы с изменяющимся зазором  $d$  между обкладками, площадью пластин  $S$  или диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Изменение входной величины вызывает изменение емкости конденсатора:

$C = \epsilon_0 \epsilon S / (d - \Delta d)$ , где  $S$ - площадь обкладок измерительных ёмкостей;  $x$ - перемещение обкладок;  $d$  - начальный зазор;  $\Delta d$  - изменение зазора;  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды между обкладок;  $\epsilon_0$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Емкостные преобразователи с переменным зазором между пластинами (рис. 11.9а) служат для измерения линейных перемещений  $x$  с точностью до 0,1...0,01 мкм; с переменной площадью (рис.11.9б)- для измерения линейных и угловых перемещений; с изменением диэлектрической проницаемости среды (рис.11.9в)- для измерения уровней, влажности, температуры, химического состава и др.

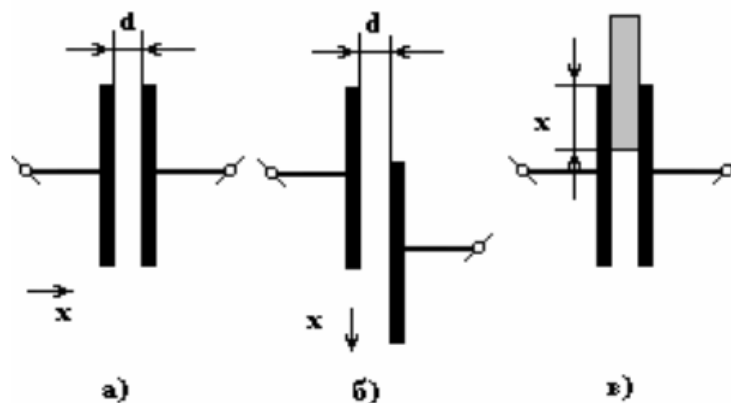


Рис. 11.9 – Емкостные чувствительные элементы.

### 11.2.7 Пьезоэлектрические чувствительные элементы

В них используется пьезоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что под действием приложенного усилия на гранях некоторых кристаллов (кварца, титана, бария, турмалина, сегнетовой соли и др.) появляются электрические заряды (прямой пьезоэффект), а при внесении пьезоэлемента в электрическое поле он деформируется (обратный пьезоэффект). При действии силы  $F$  на сжатие или растяжение на гранях пластины возникают разнополярные электрические заряды  $q$  (рис. 11.10).

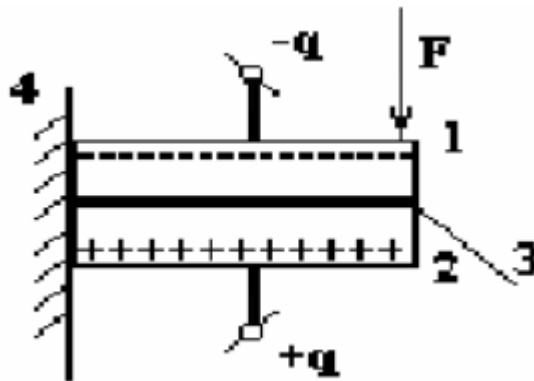


Рис. 11.10 – Возникновение пьезоэффекта в кристалле кварца: 1,2- пластины кварца; 3- электропроводящая фольга; 4- консоль крепления пластин.

В общем виде плотность зарядов  $\delta$  зависит от механического напряжения кристалла  $\sigma$ :  $\delta = d\sigma$ ,

где  $d$  - величина, постоянная для данного типа материала и конструкции чувствительного элемента.

Если к кристаллу приложить внешнее электрическое поле  $E$  (подвести электрическое напряжение), то он начнет деформироваться – изменять свои геометрические размеры, а значит, и электрическую емкость. Переменное внешнее электрическое поле приводит к возникновению в кристалле механических колебаний, частота которых зависит от его величины и конструкции. Такие пьезодатчики называются кварцевыми резонаторами – в них основная частота механических колебаний зависит от собственной частоты кристалла:

$$f = \Delta d \cdot \sqrt{\frac{E_i}{\rho}}$$

где  $E_i$  - модуль упругости пластины,  $\rho$  - плотность,  $\Delta d$  - расстояние между краями пластины.

Если включить кварцевый резонатор Пэ по схеме автогенератора (рис.11.11), то на выходе ОУ возникнет сигнал с частотой  $f$ , зависящей от приложенного внешнего воздействия – усилия, температуры, вибрации и т.п.

Конденсатор Пэ с кварцевой пластиной включен на инвертирующий вход операционного усилителя ОУ. Ток насыщения конденсатора создает падение

напряжения на инвертирующем входе ОУ, которое инвертируется и изменяет знак питания цепи  $\Pi\text{-}R$ , в результате чего возникают колебания, частота которых определяется ее постоянной времени. Частота колебаний генератора совпадает с собственной частотой кварца и возникают резонансные автоколебания.

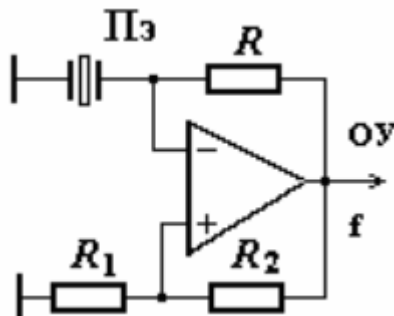


*Рис. 11.11 – Кварцевый автогенератор*

Чувствительные элементы пьезорезонансных датчиков выполняют в виде резонатора той или иной формы – прямоугольной, квадратной, круглой и т.п. Пьезоэлектрические датчики используются при измерении усилий, давлений, вибраций и других физических величин.

#### *11.2.8 Фотоэлектрические чувствительные элементы*

Фотоэлектрические чувствительные элементы преобразуют оптическое излучение в электрический сигнал. По принципу действия существуют несколько видов преобразователей: с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные; с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы) и на основе р-п-перехода (фотодиоды, фототранзисторы и т.п.). Основными характеристиками фотоэлементов являются: зависимость параметра (сопротивления, тока, напряжения) от облученности входного торца чувствительного элемента; спектральная – зависимость чувствительности от длины волны падающего излучения, частотная – зависимость чувствительности от частоты изменения излучения. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу с анодом и катодом в виде внутренней стенки с нанесенным на нее фоточувствительным слоем. Под действием светового потока в катоде возникают свободные электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к аноду, создавая внутри фотоэлемента электрический ток. В настоящее время подобные элементы применяются редко. Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (рис.11.12) представляет собой фоторезистор, принцип действия которого состоит в том, что свободные электроны, образующиеся под действием излучения в слое чувствительного проводника

(фоторезиста) 2, остаются (перераспределяются) в веществе, резко изменяя его сопротивление  $R$ .

Чувствительный материал наносится на изоляционную подложку 1 и сверху покрыт защитной тонкой прозрачной лаковой пленкой 3. Наиболее часто применяются сернисто-кадмиевые, сернисто-свинцовые, сернисто-висмутовые и селенисто-кадмиевые фоторезисторы.

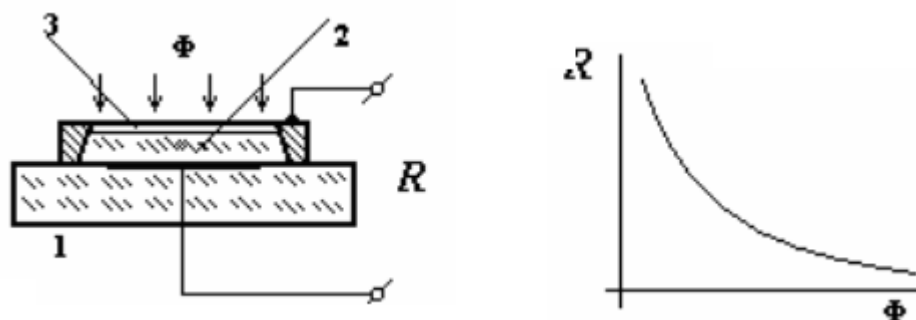


Рис. 11.12 – Устройство фоторезистора: 1- подложка; 2- фоторезист; 3- защитная пленка;  $R$ - сопротивление фоторезистора;  $\Phi$ - оптическое излучение.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом работают на использовании явлений, происходящих в переходе р-п под воздействием излучения. Они состоят (рис.9.13): 1- из металлического основания, выполняющего роль нижнего электрода, 2,3 полупроводниковых слоев р и п, оптической линзы 4.

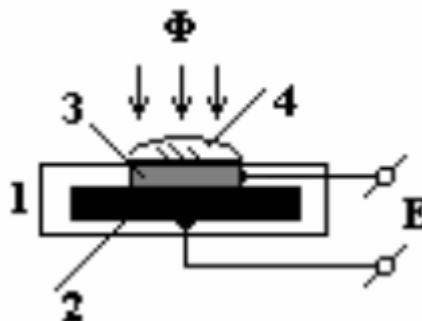


Рис. 11.13 – Конструкция фотодиода.

Р-п переход при облучении сам генерирует электрическое напряжение.

Как правило, напряжение  $E$ , возникающее на переходе, имеет положительную полярность со стороны области п. Это напряжение способно обеспечить протекание тока во внешние цепи. Чем выше интенсивность светового потока, тем больше ток  $I$  от него. Схема включения фотодиода в режиме генератора приведена на рис.11.14а.

Фотоэлектрические диоды могут использоваться в качестве управляемых излучением диодов, если внешнее напряжение  $E$  приложено к ним в обратном направлении таким образом, что п-область подключена к отрицательному потенциалу, как это показано на рис.11.14б. В этом случае обратное сопротивление диода, а значит, и ток в цепи зависят от падающего излучения.

Для изготовления фотодиодов используется германий и кремний. Кремниевые фотодиоды имеют меньшее значение темнового тока.

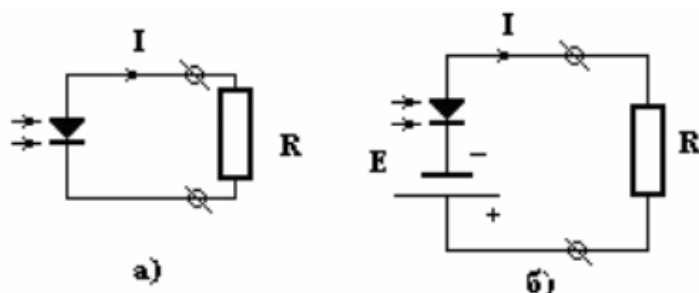


Рис. 11.14 – Схемы включения диода в генераторном режиме (а) и в обратном направлении (б).

При построении датчиков часто используются излучающие полупроводниковые диоды - *светодиоды*. Если приложить внешнее напряжение в прямом направлении диода, то это приведет к протеканию в нем электрического тока, который вызывает свечение р-п перехода. Длина волны излучаемых колебаний определяется используемым полупроводниковым материалом перехода. Интенсивность излучения возрастает при увеличении тока. Чтобы обеспечить требуемое пространственное распределение света, светодиод применяется совместно с оптическими линзами. Для изготовления светодиодов применяют арсенид галлия, дающий излучение в инфракрасной области оптического излучения, фосфид арсенида галлия, излучающий красный или оранжевый свет, и фосфид галлия (желтый или зеленый). Глаз человека имеет максимальную чувствительность на зеленом участке спектра, поэтому фосфид галлия имеет наибольшую эффективность. В датчиках применяются *диодные оптроны*. Они состоят из фотоизлучающего (светодиод)  $D_1$  и фоточувствительного приборов  $D_2$  (фотодиод, фоторезистор), сконструированных в едином устройстве (рис.11.15). Такие устройства применяются для передачи сигнала с одной электронной схемы на другую в тех случаях, когда требуется, чтобы они были электрически изолированы одна от другой.

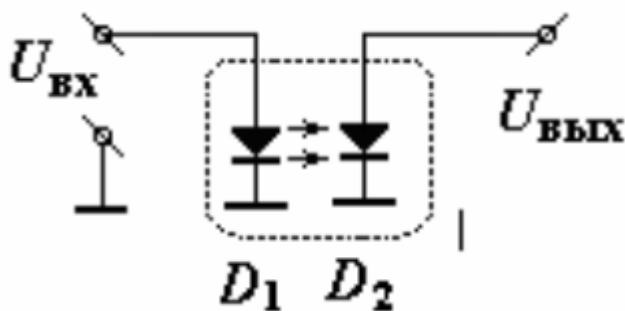


Рис. 11.15 – Схема устройства оптрона.

В настоящее время получили распространение твердотельные фотоэлектронные приборы с зарядовой связью (ПЗС). Основой ПЗС является

конденсатор МОП-структуры (металл-окисел-полупроводник). Одной обкладкой конденсатора является металлический электрод, а второй- полупроводник. Между обкладками находится слой окисла полупроводника (рис.11.16).

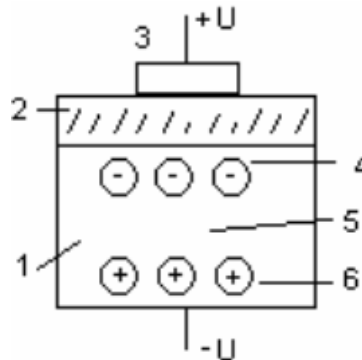


*Рис. 11.16 – Ячейка конденсатора прибора с зарядовой связью (МОП-структура): 1- p-полупроводниковая подложка; 2- окисел полупроводника; 3- металлический электрод; 4- неосновные носители; 5- обедненная область; 6- основные носители*

Если между электродом и полупроводниковой подложкой, например p-типа, приложить напряжение  $+U$ , то в результате действия электрического поля дырки (основные носители), находящиеся под электродом, отойдут в толщу слоя полупроводника. При этом под электродом образуется область, обедненная основными носителями, - потенциальная яма. Изменяя величину напряжения  $+U$  можно управлять глубиной потенциальной ямы. В образовавшейся потенциальной яме происходит накопление неосновных носителей – электронов, которые могут образовываться за счет фотоэмиссии в результате засветки МОП- структуры, применяемые в виде линеек и матриц. ПЗС- линейка (рис.11.17) – это устройство для хранения и передвижения зарядовых пакетов вдоль нее, по одной пространственной координате. Она состоит из последовательно расположенных электродов на общей подложке. Расстояние между электродами настолько мало, что обедненная область под одним электродом практически простирается до соседних электродов. Поэтому, если под одним из p-электродов, к которым приложен потенциал  $+U$ , будет накоплен заряд, образованный под действием света, то продвинуть его в соседнюю p+1 ячейку можно, если потенциальную яму этой ячейки сделать глубже, чем у p-ой ячейки. Если на три соседних электрода последовательно подавать соответствующие потенциалы  $+U$ , то можно заряды сдвигать от одного электрода к другому, т.е. перемещать сигнал вдоль строки. Проецируя на линейку, например, изображение, получают различную засветку отдельных МОП- конденсаторов, т.е. разные заряды под каждым электродом, величины которых зависят от изображения.

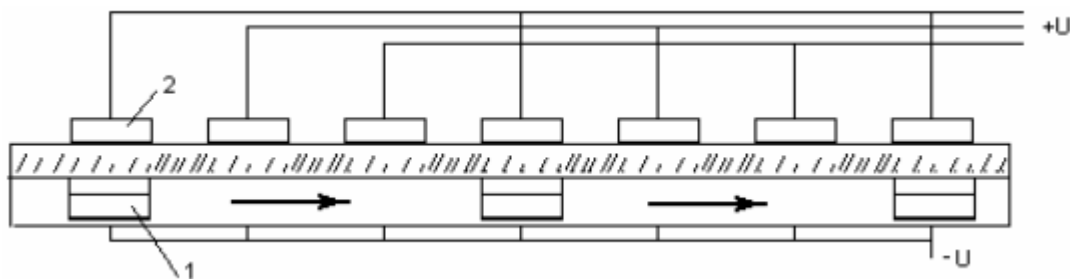


Рис. 11.17 – Линейка из МОП-конденсаторов: 1- зарядовые пакеты; 2 – электроды.

Преобразователи свет-сигнал на базе ПЗС находят широкое применение в технике телевидения. Для построения преобразователей используют две линейки, разделенных между собой затвором (рис.11.18). На верхнюю линейку, секцию накопления 1, падает изображение. В ней светочувствительные элементы накапливают зарядовые пакеты за время активной работы этой строки. Распределение зарядов вдоль строки соответствует освещенности соответствующих точек изображения. Затем накопление прерывается и с помощью электрического затвора 2 зарядовые пакеты вводятся параллельно в секцию переноса 3. После закрытия затвора вновь происходит накопление зарядов в секции 1, а из секции 3 зарядовые пакеты  $E_{\text{вых}}$  через устройство считывания 4 выводятся из преобразователя.

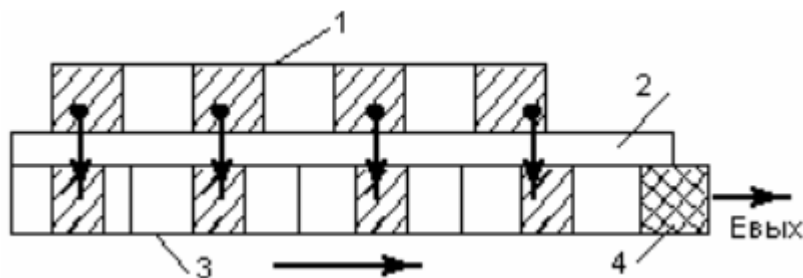


Рис. 11.18 – Линейный преобразователь на ПЗС: 1- секция накопления; 2- затвор переноса; 3- секция переноса; 4- устройство считывания зарядов.

ПЗС-матрица (рис.11.19) – это матрица из МОП-ячеек, аналогичных ПЗСлинейке, но имеющая две координаты считывания информации.

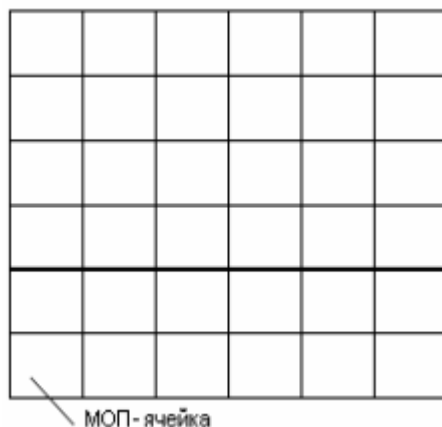


Рис. 11.19 – Матрица из МОП-ячеек.

Такие преобразователи бывают двух видов – с покадровым и межстрочным переносом. Рассмотрим матричный преобразователь с покадровым переносом (рис. 11.20). В нем поверхность экрана, поверхность проецирования изображения, образована секцией накопления 1. Накопление зарядов происходит в светочувствительных ячейках этой секции во время прямого хода развертки по кадру. После завершения накопления в течение короткого промежутка времени (обратный ход по кадру) через открывшийся затвор переноса кадра 2 зарядовые пакеты переносятся в секцию хранения 3. Секция хранения защищена от света и имеет такую же структуру, как и секция накопления. Во время прямого хода кадровой развертки режим накопления в секции 1 возобновляется. В это же время информация из хранения построчно передается в секцию переноса заряда – сдвиговый регистр 5. Сдвиг в секцию переноса осуществляется во время обратного хода развертки по строкам через затвор переноса 4. Зарядовые пакеты  $E_{\text{вых}}$  из секции переноса выводятся поэлементно в устройство считывания зарядов 6 за время прямого хода строчной развертки. Промышленностью выпускается и широкий спектр ПЗС-приборов для видимой и инфракрасной областей спектра оптического излучения, на базе которых изготавливаются телевизионные датчики различного назначения

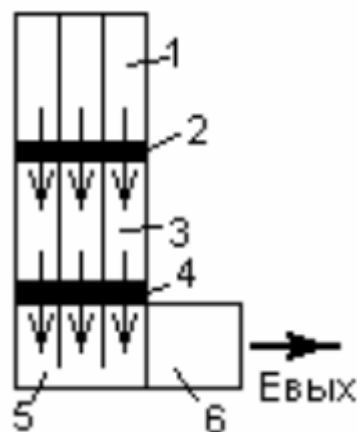


*Рис. 11.20 – Матричный преобразователь на ПЗС с покадровым переносом: 1 – секции накопления; 2, 4 – затворы переноса; 3 – секции хранения; 5 – секции переноса; 6 – устройства считывания зарядов*

### 11.2.9 Элементы, чувствительные к температуре

Температура является одним из основных параметров технологических процессов. Температура среды оказывает влияние на параметры многих материалов – размеры, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущую силу и т.д. В качестве чувствительных элементов датчиков температуры применяются тепломеханические элементы, термопары, терморезисторы, р-п- переходы, кристаллы кварца, кремния и их соединений и многие другие материалы и явления в них.

Тепломеханические датчики (термобиметаллические, дилатометрические) используются в качестве чувствительных элементов, преобразующих изменение фактического значения регулируемой температуры в перемещение (рис.11.21). *Биметаллический* чувствительный элемент (рис.11.21а) представляет собой две узкие металлические пластинки 1 и 2 с различными коэффициентами температурного расширения, жестко скрепленные между собой по всей плоскости касания (спаянные).

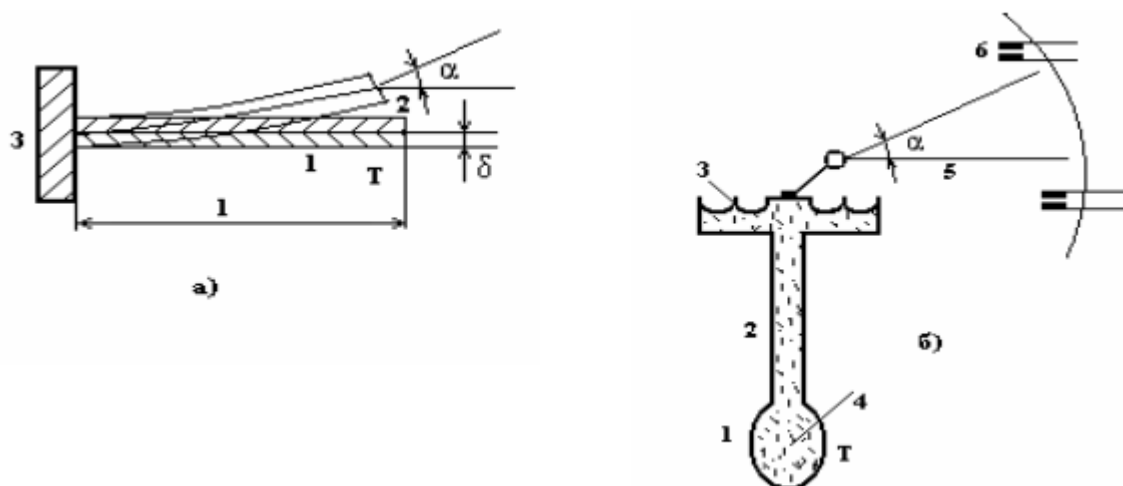


Рис. 11.21 – Тепломеханические чувствительные элементы: а)- биметаллический; б)- дилатометрический.

Один конец биметаллической пластинки неподвижно закреплен в основании 1, а второй – свободен. При длине плоской пластинки  $l$ , значительно превышающей ее толщину  $\delta$ , угол перемещения свободного конца  $\alpha$  будет зависеть от температуры окружающей среды  $T$ .

На пути изгиба биметаллической пластинки можно поставить, например, электрические контакты, которые будут включать электрическую сеть. Подобные чувствительные элементы используют для двухпозиционного регулирования (включено-выключено) температуры.

На рис. 11.21б показан *тепломеханический-дилатометрический* преобразователь с расширяющейся жидкостью или газом. Изменение температуры  $T$  металлического баллона 1 связано с изменением давления находящихся в нем жидкости или газа 4, так как коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов гораздо выше, чем металлов. При изменении давления перемещается свободный конец мембраны 3, связанный с баллоном через капилляр 2. Указатель 5, связанный с мембраной 3, может включать электрические контакты 6, установленные под определенным углом  $\alpha$ , соответствующим температуре  $T$ .

В качестве термометрических жидкостей применяются амиловый спирт, ацетон, ртуть, и газовые наполнители – азот, гелий и др. Термобиметаллические и дилатометрические чувствительные элементы

применяются для измерения температур в диапазоне от -60 до +450°C. Погрешность преобразования составляет 1...5%.

*Терморезисторами* называют элементы, электрическое сопротивление которых зависит от температуры. Для их изготовления используют медь, платину и другие металлы, удельное сопротивление  $\rho$  которых увеличивается с повышением температуры  $T$  по закону  $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$ , где  $\rho_0$  - удельное сопротивление металла при 0°C,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления Ом/К, показывающий на сколько, увеличивается удельное сопротивление терморезистора при увеличении температуры на 1°C.

Чувствительный элемент металлического терморезистора помещается в стальной или латунный корпус с клеммой головкой и представляет собой бифилярную обмотку из проволоки диаметром 0,04...0,08 мм, размещенную на изолированном корпусе, к концам. Погрешность измерений металлических терморезисторов не превышает 0,5...1%. Из металлических терморезисторов наибольшее распространение получили термометры сопротивления типа ТСП (платиновые) и ТСМ (медные).

*Термисторы* – это полупроводниковые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, а *позисторы* – с положительным.

Нелинейность характеристик ограничивает применение термисторов при измерениях температуры в узких пределах. Большой разброс по номинальному сопротивлению затрудняет их взаимозаменяемость. Распространены медно-марганцевые (ММТ), кобальто-марганцевые (КМТ), косвенного подогрева (ТКП) и другие термисторы для температур от -203 °К до 523 °К. Чувствительность термисторов в 5...30 раз выше чувствительности металлических терморезисторов. Зависимость термистора от температуры и схема его включения приведены на рис.9.22. В практике измерения температуры в рабочем диапазоне -60...+120° С с погрешностью измерения 0,1 % получили распространение кремниевые *p-n* переходы, выполненные в виде смещённых в прямом направлении диодов или базо-эмитерных переходов транзисторов. Отрицательный температурный коэффициент падения напряжения на базо-эмитерном переходе кремниевого биполярного транзистора составляет  $2,2 \times 10^{-3}$  В/°С, а германиевого  $-2,7...3,1 \times 10^{-3}$  В/°С. которой припаиваются выводы из серебряной, а при температуре до 100°C — из медной проволоки.

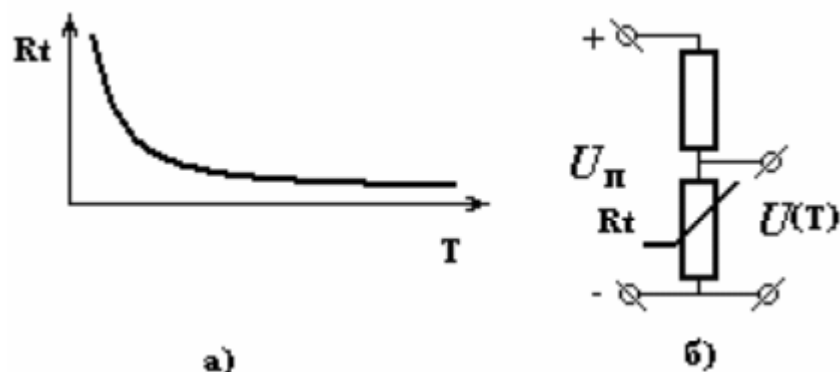


Рис. 11.22 – Зависимость электрического сопротивления термистора  $R_t$  от температуры  $T$  (а) и схема его включения (б)

Терморезисторы и р-п переходы (диоды, транзисторы) используются для построения датчиков температуры, теплосчетчиков, термоанемометров и т.п.

**Термопары.** Термопара – термоэлектрический преобразователь (рис.11.23) состоит из двух 1 и 2 металлов, концы которых А и Б спаяны. Металлы обладают разными термоэлектрическими свойствами. Для изготовления термопар используют пары сплавов «хромелькопель» или «хромель-алюмель». Спаянный конец называется рабочим спаем, он погружается в измеряемую среду (температура  $T_1$ ), а свободные концы (холодный спай-температура  $T_0$ ) подключаются ко входу измерительной схемы П.

Если температуры рабочего спая и свободных концов различны, то термопара вырабатывает термоэлектродвижущую силу. Она зависит от разности температур двух спаев термопары, и для снижения погрешности показаний необходимо знать температуру холодного спая, чтобы компенсировать эту разницу в дальнейших вычислениях.

Подключение термопары к схеме измерения осуществляется проводами тех же металлов, что и термопары.

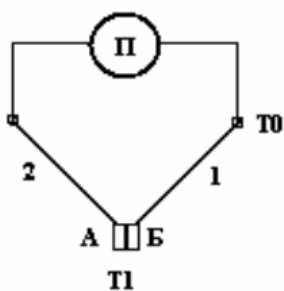


Рис. 11.23 – Термопара.

Термопары применяются в системах автоматического регулирования и контроля в диапазоне температур от 373 до 3000 °К. Чувствительность термопары обычно невелика и составляет для разных термопар 0,01...0,07 мВ/°С.

### Контрольные вопросы к главе 11.

1. Дайте определение датчика.
2. Перечислите основные характеристики датчиков.

3. Что такое чувствительный элемент датчика?
4. Дайте определение диапазона измерений датчика.
5. Дайте определение статической характеристики датчика.
6. Дайте определение коэффициенту чувствительности датчика.
7. Может ли быть коэффициент чувствительности переменной величиной?
8. Дайте определение точности датчика.
9. Дайте определение быстродействию датчика.
10. Дайте определение времени успокоения датчика.
11. Требуется ли параметрический чувствительный элемент для своей работы дополнительного источника энергии?
12. Назовите основные недостатки механических чувствительных элементов.
13. Назовите вид входной величины, которая должна поступать на вход потенциометрического элемента.
14. Какие материалы могут использоваться в тензочувствительных элементах?
15. Какой параметр индуктивного чувствительного элемента изменяется при измерении перемещения объекта?
16. Назовите два типа индукционных преобразователей.
17. Почему сигнал индукционного преобразователя зависит от скорости перемещения ферромагнетика?
18. Какие параметры вещества должны измениться, чтобы на выходе емкостного чувствительного элемента появился полезный сигнал?
19. Опишите прямой пьезоэффект.
20. Опишите обратный пьезоэффект.
21. Опишите работу кварцевого генератора.
22. Назовите виды фотоэлектрических преобразователей.
23. От чего зависит ток фотоэлектрического преобразователя?
24. Опишите работу фотоэлемента с внешним фотоэффектом.
25. Опишите работу с внутренним фотоэффектом.
26. В чем преимущество фотодиода, включенного по генераторной схеме?
27. Назовите разницу между светодиодом и оптроном.
28. Опишите принцип работы ПЗС-матрицы.
29. Поясните принцип действия термопары.
30. Поясните принцип действия терморезистора.
31. Для чего необходим холодный спай термопары?
32. Перечислите возможные виды элементов, чувствительных к температуре.
33. Из каких частей состоит биметаллический чувствительный элемент?

## **Глава 12. Электрические аппараты и элементы автоматики**

### 12.1. Общие сведения об электрических аппаратах

**Электрический аппарат** — электротехническое устройство, предназначенное для коммутации, распределения электрической энергии между потребителями и для их защиты от ненормальных режимов работы (коротких замыканий, перегрузок, обрывов и т. д.).

Классификация электрических аппаратов:

1) по выполняемой функции и назначению:

- ♦ коммутирующие аппараты (выключатели, разъединители);
- ♦ аппараты управления (контакторы, магнитные пускатели, контроллеры);
- ♦ аппараты сигнализации и защиты (предохранители, автоматические выключатели, разрядники, реле различного типа);

2) по величине напряжения:

- ♦ аппараты низкого напряжения НН (до 1000 В);
- ♦ аппараты высокого напряжения ВН (свыше 1000 В).

3) по значению коммутируемого тока:

- ♦ слаботочные аппараты (до 5 А);
- ♦ силовоточные аппараты (свыше 5 А).

4) по роду тока:

- ♦ постоянного тока;
- ♦ переменного тока.

5) по частоте источника питания:

- ♦ аппараты с нормальной частотой (50 Гц);
- ♦ аппараты с повышенной частотой (от 400 Гц до 10 КГц).

6) по числу разрываемых контактов — полюсов:

- ♦ однополюсные;
- ♦ двухполюсные;
- ♦ трехполюсные.

### 12.2. Неавтоматические выключатели

**Неавтоматический выключатель** — электрический аппарат, осуществляющий ручное включение и отключение электрических цепей (элементов защиты не имеет).

К неавтоматическим выключателям относятся рубильники, кнопки управления, пакетные выключатели и переключатели, универсальные переключатели, разъединители, выключатели нагрузки.

*Рубильники* — электрические коммутационные аппараты с ручным управлением, предназначенные для включения, отключения и переключения электрических цепей либо под нагрузкой (при напряжениях до 440 В на постоянном токе и до 660 В на переменном), либо при отсутствии тока. При замыкании рубильника контактные ножи под действием рукоятки

поворачиваются вокруг оси и «врубаются» в неподвижную пружинящую контактную стойку.

По числу контактов рубильники подразделяют на одно-, двух-, трех- и многополюсные.

Конструкционный вид рубильников и их условное графическое обозначение (УГО) на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 12.1.

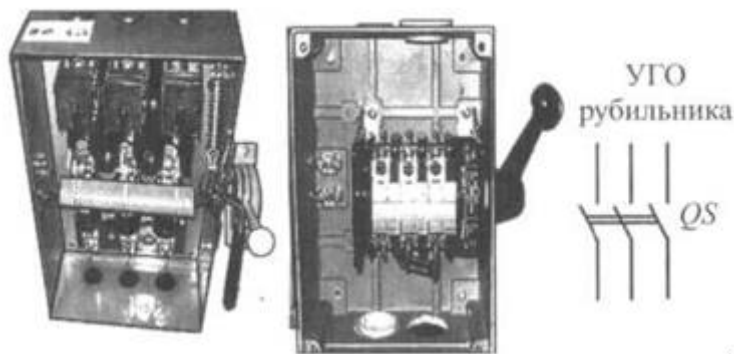


*Рис.12.1 Конструкционный вид рубильников и их условное графическое обозначение*

Кнопки управления предназначены для подачи управляющего воздействия при управлении различными электромагнитными аппаратами, а также для коммутирования цепей управления, сигнализации, электрической блокировки и других цепей постоянного и переменного тока.

Кнопки используют в цепях переменного тока при напряжении до 660 В и цепях постоянного тока — до 440 В.

Кнопки управления различают по величине, набору замыкающих и размыкающих контактов, номинальному току и напряжению, форме и цвету толкателей. Они бывают с самовозвратом в исходное положение, с защелками, фиксирующими положение после нажатия; включаемые специальным ключом и др.

Конструкционный вид кнопок и их УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 12.2.



УГО кнопок с самовозвратом  
контакты в исходном  
положении замкнутые



контакты в исходном положении  
разомкнутые

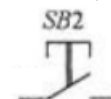


*Рис. 12.2. Конструкционный вид кнопок и их условное графическое обозначение*

*Пакетные выключатели и переключатели* предназначены для коммутации силовых электрических цепей с переменным напряжением 380 В и постоянным напряжением 220 В.

Пакетные выключатели состоят из отдельных колец — пакетов, изготовленных из изолирующего материала. Внутри пакета находится контактная система, которая состоит из неподвижного и подвижного контактов. Из таких пакетов можно набрать любое количество полюсов.

Конструкционный вид пакетных выключателей и переключателей, а также их УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис.12.3



*12.3 Конструкционный вид пакетных выключателей и переключателей, а также их условное графическое обозначение*

К неавтоматическим аппаратам высокого напряжения также относятся выключатели, выключатели нагрузки и разъединители.

*Выключатели* служат для коммутации высоковольтных цепей.

Основные типы высоковольтных выключателей:

- ♦ масляные выключатели (дуогасительное устройство заполнено трансформаторным маслом, гашение электрической дуги осуществляется путем эффективного ее охлаждения потоками газа, возникающего при разложении масла дугой; используются на напряжение 10—20 кВ и 10-220 кВ);
- ♦ электромагнитные выключатели (на дугу действует магнитное поле, которое загоняет дугу в керамическую гасительную камеру, используются на напряжение 6-10 кВ);
- ♦ воздушные выключатели (гашение дуги осуществляется потоками сжатого воздуха, используются на напряжение до 1150 кВ);
- ♦ элегазовые выключатели (гашение дуги осуществляется потоками элегаза либо путем подъема давления в камере за счет дуги, горящей в замкнутом объеме газа, применяется на все классы напряжения);
- ♦ вакуумные выключатели (контакты расходятся в вакууме, применяются при напряжениях 35 кВ).

*Выключатели нагрузки* — простейшие высоковольтные выключатели. Они используются для отключения и включения цепей, находящихся под нагрузкой (не способны отключать токи короткого замыкания).

*Разъединители* — электрические аппараты, предназначенные для отключения и переключения участков электрической цепи под напряжением (35—500 кВ)

при отсутствии тока. Создают видимый разрыв электрической цепи. Конструкционный вид разъединителя и его УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 12.4

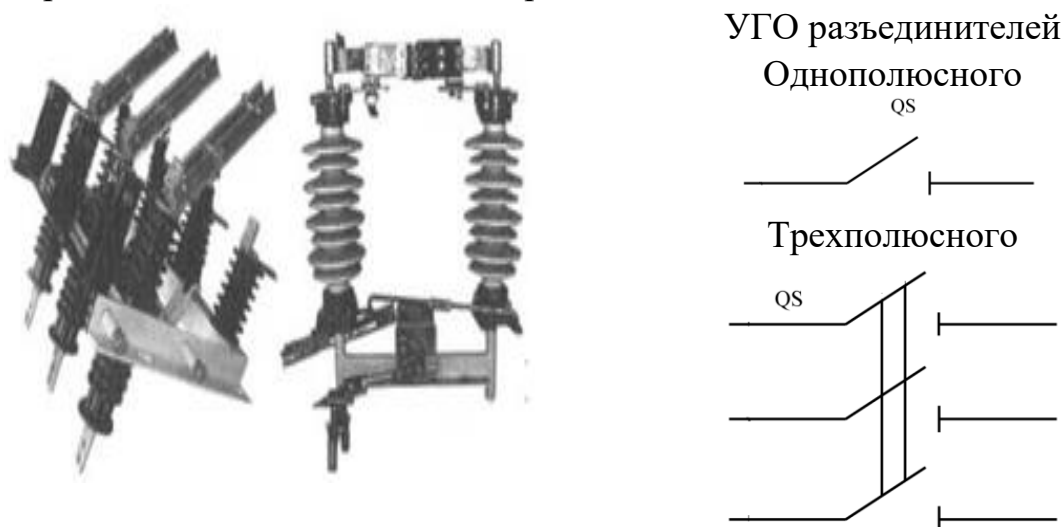


*Рис.12.4 Конструкционный вид разъединителя и его условное графическое*

### 12.3. Предохранители

**Предохранитель** — простейшее устройство для защиты электрических цепей и потребителей электрической энергии от перегрузок и токов короткого замыкания.

Основными элементами предохранителя являются корпус, плавкая вставка (плавкий элемент), контактная часть, дугогасительная среда.

Предохранители изготавливаются с расчетом на свое определенное напряжение и переменный или постоянный ток.

Плавкие вставки имеют зауженные участки, которые расплавляются в первую очередь. Плавкий предохранитель включается последовательно в электрическую цепь и при расплавлении вставки размыкает ее.

Высоковольтные предохранители выпускаются в основном двух типов:

- 1) с кварцевым наполнителем (песком) для лучшего охлаждения плавкой вставки и гашения дуги на напряжение 3—35 кВ;
- 2) выхлопного типа на напряжение 10—110 кВ.

Конструкционный вид предохранителей и их УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 10.5

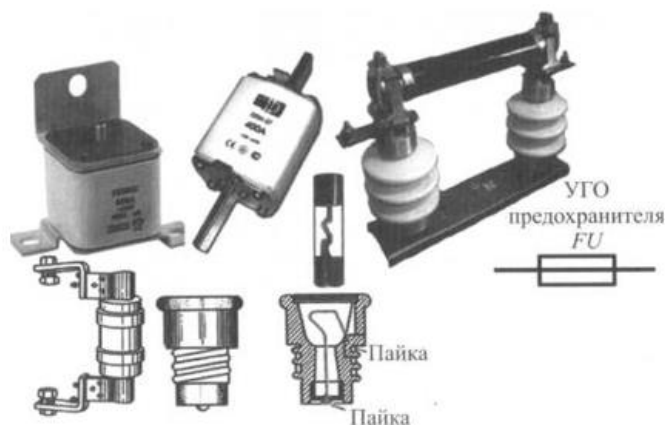


*Рис. 12.5. Конструкционный вид предохранителей и их условное графическое обозначение*

#### 12.4. Автоматические выключатели

**Автоматический выключатель** — электрический аппарат, осуществляющий ручную коммутацию электрических цепей, а также их автоматическое отключение при нарушении нормального режима работы (перегрузки, короткого замыкания и т. д.).

Автоматические выключатели предназначены для защиты электрических установок от перегрузок и коротких замыканий, а также для нечастых включений и отключений электрических цепей. Некоторые модели обеспечивают защиту от других аномальных состояний, например от недопустимого снижения напряжения.

Конструкционный вид и внутреннее устройство однофазного автоматического выключателя показано на рис. 12.6

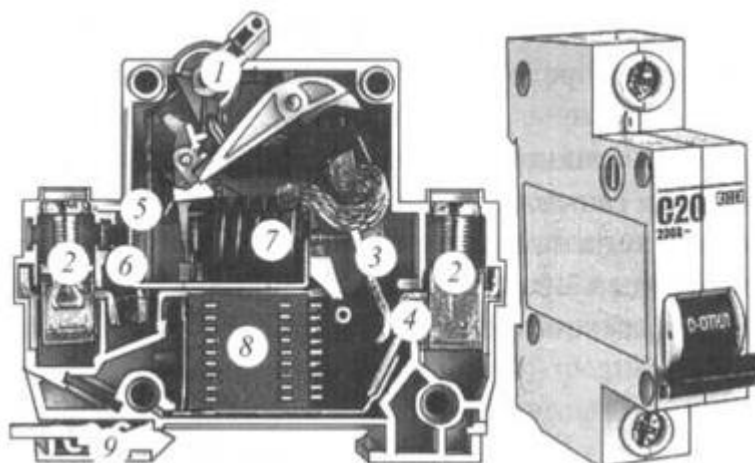


*Рис.12.6. Конструкционный вид и внутреннее устройство однофазного автоматического выключателя*

Включение-отключение автоматического выключателя производится рычажком 1, провода подсоединяются к винтовым клеммам 2. Защелка 9 фиксирует корпус выключателя на DIN-рейке и позволяет при необходимости легко его снять (для этого следует оттянуть защелку, вставив отвертку в петлю защелки).

Коммутацию цепи осуществляют подвижный 3 и неподвижный 4 контакты. Подвижный контакт подпружинен, пружина обеспечивает усилие для быстрого расцепления контактов. Механизм расцепления приводится в действие одним из двух расцепителей: тепловым или электромагнитным.

*Тепловой расцепитель* предназначен для защиты цепей от токов длительной перегрузки и представляет собой биметаллическую пластину 5, нагреваемую протекающим током. При протекании тока выше допустимого значения биметаллическая пластина изгибается и приводит в действие механизм расцепления. Время срабатывания зависит от тока. Настройка тока срабатывания производится в процессе изготовления регулировочным винтом 6. Тепловой расцепитель не защищает электрические сети от коротких замыканий, поскольку обладает большой тепловой инерцией.

*Электромагнитный (мгновенный) расцепитель* представляет собой соленоид 7, подвижный сердечник которого также может приводить в действие механизм расцепления. Ток, проходящий через выключатель, течет по обмотке соленоида и вызывает втягивание сердечника при превышении заданного порога. Мгновенный расцепитель в отличие от теплового срабатывает очень быстро (доли секунды), но при значительно большем превышении тока: в 2—10 раз от номинала, в зависимости от типа (автоматические выключатели делятся на типы *B*, *C* и *D* в зависимости от чувствительности мгновенного расцепителя).

Во время расцепления контактов может возникнуть электрическая дуга, поэтому контакты имеют особую форму и находятся рядом с дугогасительной решеткой 8. Задача дугогасительного устройства заключается в том, чтобы ограничить размеры дуги и обеспечить ее гашение в малом объеме.

Автоматические выключатели выполняются одно-, двух-, трех- или четырехполюсными.

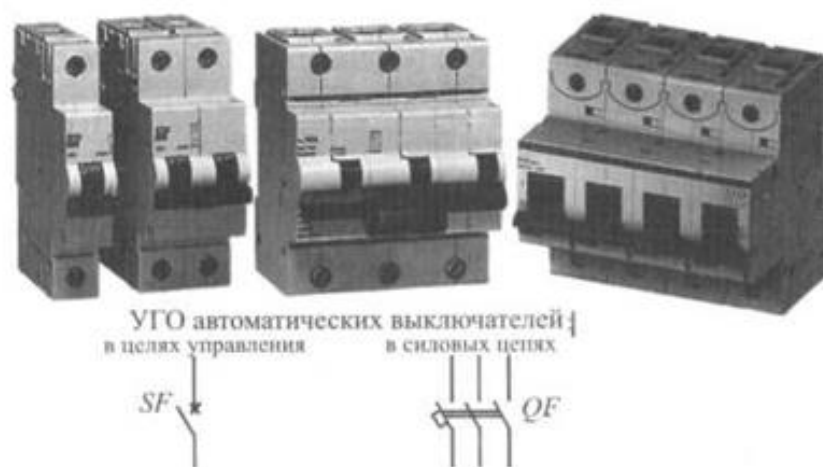


*Рис. 12.7. Конструкционный вид автоматических выключателей и их условное графическое обозначение*

Конструкционный вид автоматических выключателей и их УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 10.7.

### 12.5. Устройство защитного отключения (УЗО)

— механический коммутационный аппарат или совокупность элементов, которые при достижении (превышении) дифференциальным током заданного значения при определенных условиях эксплуатации должны вызвать размыкание контактов. Может состоять из различных отдельных элементов, предназначенных для обнаружения, измерения (сравнения с заданной величиной) дифференциального тока и замыкания и размыкания электрической цепи (разъединителя).

*Основная задача УЗО* — защита человека от поражения электрическим током и от возникновения пожара, вызванного утечкой тока через изношенную изоляцию проводов и некачественные соединения.

Принцип работы УЗО (рис. 12.8) основан на измерении баланса токов между входящими в него токоведущими проводниками с помощью дифференциального трансформатора тока. Если баланс токов нарушен, то УЗО немедленно размыкает все входящие в него контактные группы, отключая таким образом неисправную нагрузку.

УЗО измеряет алгебраическую сумму токов, протекающих по контролируемым проводникам (двум — для однофазного УЗО, четырем — для трехфазного и т. д.): в нормальном состоянии ток, «втекающий» по одним проводникам, должен быть равен току, «вытекающему» по другим, т. е. сумма токов, проходящих через УЗО равна нулю (точнее, сумма не должна превышать допустимое значение). Если же сумма превышает допустимое значение, то это означает, что часть тока проходит помимо УЗО, т. е. контролируемая электрическая цепь неисправна — в ней имеет место утечка.

С точки зрения электробезопасности УЗО принципиально отличаются от устройств защиты от сверхтока (предохранителей) тем, что УЗО предназначены именно для защиты от поражения электрическим током, поскольку они срабатывают при утечках тока значительно меньших, чем предохранители. УЗО должны срабатывать за время не более 25—40 мс, т. е. до того, как электрический ток, проходящий через организм человека, вызовет фибрилляцию сердца — наиболее частую причину смерти при поражениях электрическим током.

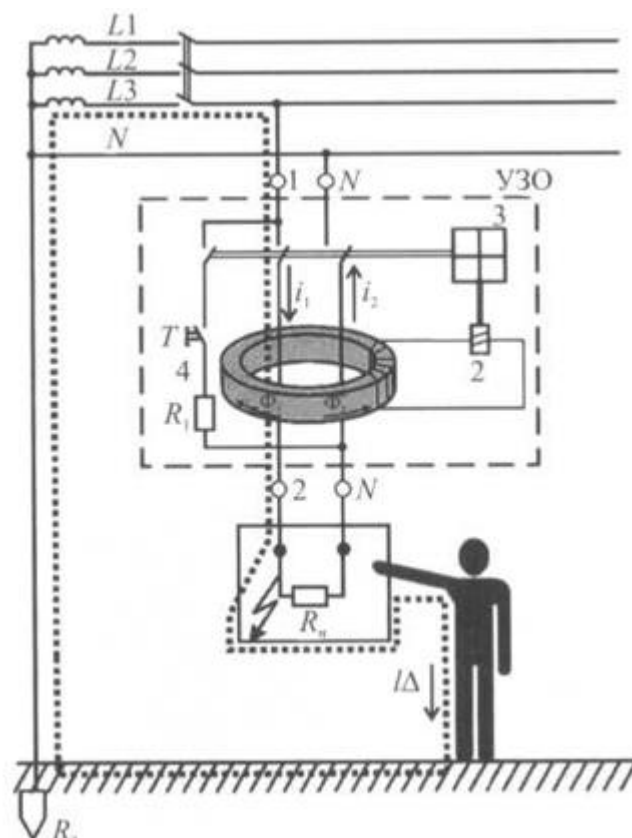


Рис. 12,8. Принцип работы устройства защитного отключения  
Конструкционный вид и внутреннее устройство трехфазного УЗО показаны  
на рис. 10.9

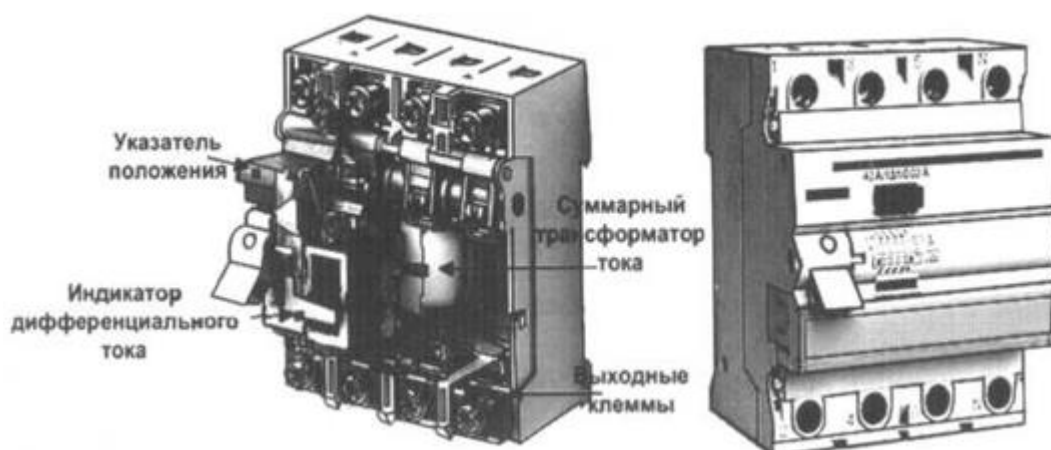


Рис.12.9. Конструкционный вид и внутреннее устройство трехфазного УЗО

## 12.6. Реле

**Реле** — электрический аппарат, предназначенный для коммутации цепей в схемах автоматизированного управления и защиты технологических установок, электрических сетей и систем (осуществляющий скачкообразное изменение выходной величины под действием плавно изменяющейся входной величины).

Реле классифицируются по следующим признакам:

- ♦ по принципу действия (электромагнитные, магнитные, электро-механические, электротепловые, электропневматические, оптические, акустические, механические, электронные);
- ♦ по роду тока (постоянного тока, переменного тока);
- ♦ по контролируемой или воспроизводимой величине (реле напряжения и тока, реле времени, реле давления, реле скорости, реле уровня и т. д.);
- ♦ по назначению (реле управления, реле защиты);
- ♦ по виду рабочего органа (контактные, бесконтактные).

*Электромагнитное реле* (рис. 12.10), состоит из катушки 1 с железным сердечником 2, якоря 3, возвратной пружины и электрических контактов 4. Реле работает следующим образом: при замыкании электрической цепи реле по его обмотке протекает ток, магнитное поле катушки усиливается железным сердечником, к которому притягивается якорь. При повороте якоря происходит замыкание или размыкание контактных пружин (это зависит от конструкции реле).

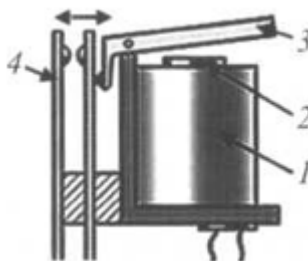


*Рис.12.10. Электромагнитное реле*

К основным параметрам электромагнитного реле относятся: ток срабатывания ( $I_{ср}$ ), напряжение срабатывания ( $U_{ср}$ ), ток отпускания ( $I_{отп}$ ), напряжение отпускания ( $U_{отп}$ ), время задержки срабатывания ( $t_{зад}$ ), параметры катушки. Якорь притягивается и контакты замыкаются (размыкаются) только при превышении некоторого определенного значения силы тока в катушке. Это значение тока называют током срабатывания ( $I_{ср}$ ).

При уменьшении силы тока в обмотке реле ниже значения тока срабатывания и называемого током отпускания ( $I_{отп}$ ) контактные пружины возвращают якорь реле в исходное состояние.

Ток срабатывания реле зависит от числа витков обмотки, жесткости пружины, амплитуды хода (отклонения) якоря.

Конструкционный вид электромагнитного реле и его УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 12.11.

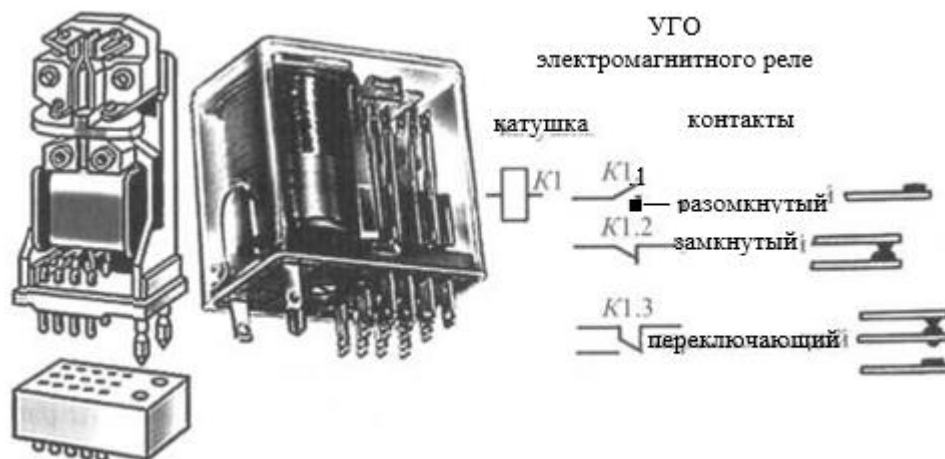


*Рис.12.11. Конструкционный вид электромагнитного реле и его условное графическое обозначение*

Основной общей характеристикой реле является характеристика управления, которая выражает связь между воздействующей физической величиной и управляемой величиной, например между током  $I$  и напряжением  $U$  (рис. 12.12).

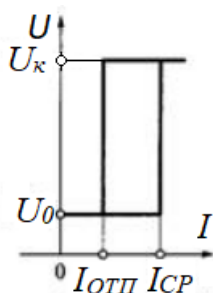


*Рис.12.12 Характеристика управления реле*

Возрастание управляющей величины  $I$  не вызывает изменения управляемой величины пока управляющая величина меньше определенного значения, которое называется током срабатывания. Когда управляющая величина достигнет  $I_{ср}$ , тогда исполнительная часть реле вызывает скачкообразное изменение управляемой величины  $U$  (включает электрическую цепь), которое достигает определенного значения  $U_k$ .

Одним из самых чувствительных электромагнитных реле является поляризованное реле. Чувствительность (малый ток срабатывания) у этого реле обеспечивается подмагниченным сердечником и соблюдением полярности подключения источника тока к обмоткам реле.

Электромагнитные реле применяют в тех автоматических устройствах, которые способны управлять сильными токами с помощью слабых токов. Слабые токи проходят по обмотке реле, а сильные через контактные группы.

*Тепловое реле* предназначено для защиты электрических двигателей и другого электрооборудования от длительных перегрузок.

Для защиты от перегрузок, наиболее широкое распространение получили тепловые реле с биметаллической пластиной.

Биметаллическая пластина теплового реле состоит из двух пластин, одна из которых имеет больший температурный коэффициент расширения, другая — меньший. В месте прилегания одной пластины к другой они жестко скреплены либо за счет проката в горячем состоянии, либо за счет сварки. При нагреве биметаллического элемента пластина изгибается в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения, действует на защелку, в результате контакт теплового реле размыкается.

Нагрев биметаллического элемента теплового реле может производиться за счет тепла, выделяемого в пластине током нагрузки. Очень часто нагрев биметалла производится от специального нагревателя, по которому протекает ток нагрузки.

Из-за инерционности такие реле непригодны для защиты цепей от токов короткого замыкания.

Конструкционный вид тепловых реле и их УГО на принципиальных электрических схемах показаны на рис. 12.13.

*Электронные реле* являются бесконтактными устройствами и представляют собой электронные схемы, в которых роль контактов выполняют полупроводниковые приборы, работающие в ключевом режиме: транзисторы, тиристоры, микросхемы и др. Наибольшее применение в устройствах коммутации получили твердотельные оптоэлектронные реле.

*Твердотельное оптоэлектронное реле* — электронный компонент, который служит для бесконтактной коммутации электронных цепей и обеспечивает электрическую изоляцию между цепями, преимущественно силовыми.

Управляющая цепь твердотельного реле содержит светодиод, преобразующий протекающий через него ток в инфракрасное излучение. Инфракрасный свет оптической развязки попадает на матрицу фотогальванических ячеек, затем преобразует падающий на нее свет в напряжение, которое, в свою очередь, управляет элементом, замыкающим выходной ключ. Если в управляющей цепи тока нет, то формирование напряжения отсутствует и выходной ключ размыкает цепь коммутации. В оптореле переменного тока на выходе используется симистор или два встречновключенных тиристора (рис. 10.14, *а*). Его особенностью является то, что размыкание выходного ключа происходит в момент, когда напряжение в коммутируемой цепи проходит через ноль. В оптореле постоянного тока в качестве выходного ключа используется биполярный или МОП-транзистор. В универсальных оптореле в качестве ключа используется пара МОП-транзисторов соединенных истоками (рис. 12.14, *б*), или IGBT.

*Фотореле* — электронное реле, разработанное на базе фотоэлементов. Фотореле предназначены для автоматического включения и отключения в зависимости от окружающей освещенности, уличного освещения или мест общего пользования, индивидуальных рабочих мест и т.д.

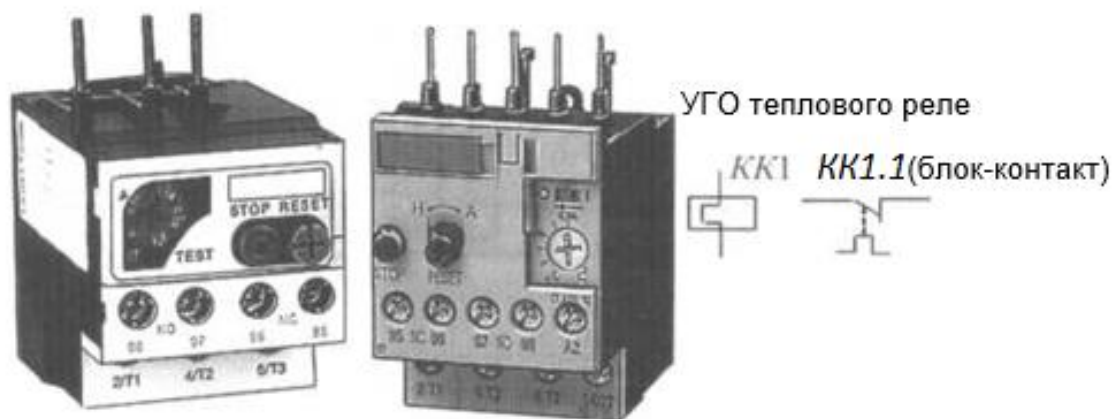


Рис.12.13 Конструкционный вид тепловых реле и их условное графическое обозначение

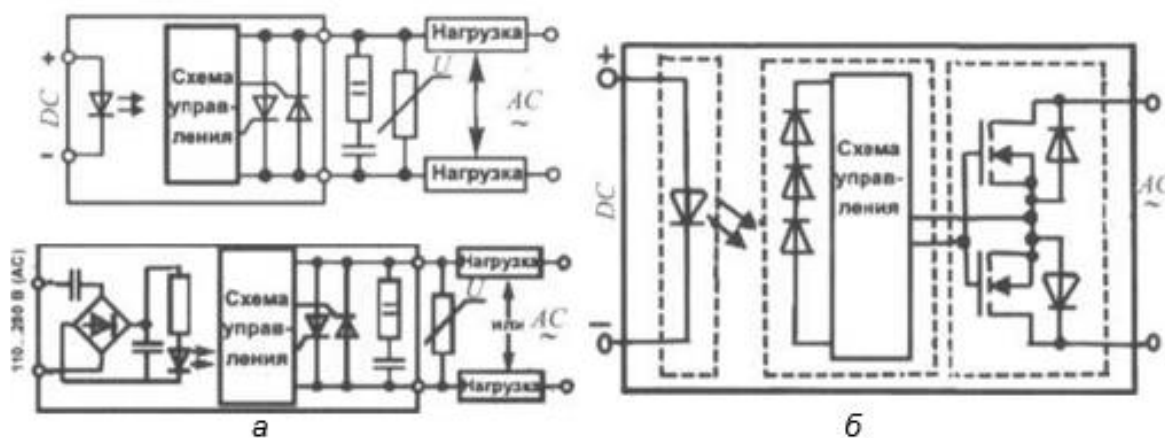


Рис.12.14. Схема твердотельного оптоэлектронного реле с выходным тиристорным ключом (а) и с ключом на МОП-транзисторах (б)

Реле времени предназначены для создания выдержки времени в цепях автоматического управления. Применение получили несколько типов реле времени:

- ♦ электромагнитное реле времени (используется в цепях постоянного тока);
- ♦ электронное реле времени.

## 12.7. Герконы

**Герконы** (герметизированные магнитоуправляемые контакты) представляют собой запаянные в герметизированный баллон, заполненный инертным газом, или находящиеся в вакууме контакты, которые могут замыкаться или размыкаться под воздействием внешнего магнитного поля. Герконы используются как бесконтактные выключатели, датчики близости и т. д.

Основными элементами герконов (рис. 12.15) являются пермаллоевые пластины, концы которых покрыты золотом, серебром или родием. Пермаллоевые пластины выполняют одновременно роль магнитопровода и контактных пружин, а их концы — контактов. При поднесении к геркону постоянного магнита или включении электромагнита возникает магнитное поле, которое, замыкаясь через пермаллоевые пластины, создает

электромагнитное усилие, в результате контакты замыкаются или размыкаются.

Геркон с электромагнитной катушкой составляет *герконовое реле*.

Существуют также герконы, размыкающие цепь при возникновении магнитного поля, и герконы с переключающей группой контактов.

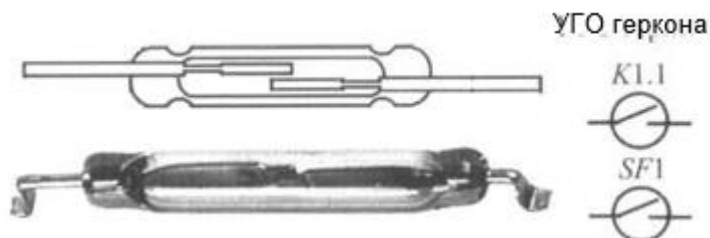


Рис. 12.15. Геркон и его условное графическое обозначение

Герконы, рассчитанные на токи свыше 5 А, называются *герсиконами*. Чтобы отличить контакты геркона на электрических схемах от других коммутационных изделий в его УГО вводят символ герметичного корпуса — окружность. Принадлежность геркона к реле указывают в позиционном обозначении буквами K1.1. Если же геркон не является частью реле, а управляется постоянным магнитом, его обозначают кодом автоматического выключателя — буквами SF.

## 12.8. Аппараты управления

**Аппарат управления** — электрический аппарат, предназначенный для управления работой электротехнических устройств (например, пуск, регулирование частоты вращения, торможение, реверс электрических двигателей).

К аппаратам управления относятся контроллеры, контакторы и магнитные пускатели.

*Контроллер* — электрический аппарат, с помощью которого изменяют схемы включения в силовой цепи и цепи возбуждения электрических машин.

Конструктивно контроллер представляет собой переключающее многоступенчатое устройство. Привод контроллеров ручной, ножной или электродвигательный. Переключающее контактное устройство состоит из ряда неподвижных контактов, с которыми замыкаются или размыкаются подвижные контакты при повороте вала.

В последнее время широкое применение получили электронные контроллеры, в которых изменение схемы коммутации происходит при помощи полупроводниковых ключей, выполненных на базе транзисторов или интегральных микросхем.

*Контакторы* — двухпозиционные аппараты с самовозвратом дистанционного управления, которые предназначены для частых включений и отключений силовых электрических цепей при нормальных режимах работы. В контакторах предусмотрены защиты, присущие автоматам.

При подаче питания на электромагнитную катушку (рис. 12.16), расположенную на ферромагнитном сердечнике, подвижная часть якоря притягивается к сердечнику, при этом силовые контакты замыкаются.

При исчезновении напряжения или его уменьшении до 50 % от номинального под действием пружин якорь возвращается в исходное состояние.

Конструкционный вид контакторов показан на рис. 12.17.

*Магнитные пускатели* — аппараты, которые предназначены для дистанционного управления и тепловой защиты нагрузки (электродвигателей и т. д.) по переменному току, а также для исключения самопроизвольного включения, например электродвигателя, после временного пропадания электрической энергии в сети. Пускатель представляет собой контактор, укомплектованный дополнительным оборудованием: тепловым реле, дополнительной контактной группой или автоматом для пуска электродвигателя, плавкими предохранителями.

Исполнение магнитных пускателей может быть открытым и защищенным (в корпусе); реверсивным и нереверсивным; со встроенной тепловой защитой электродвигателя от перегрузки и без нее.

При наличии тепловых реле пускатели осуществляют защиту управляемых электродвигателей от перегрузки недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

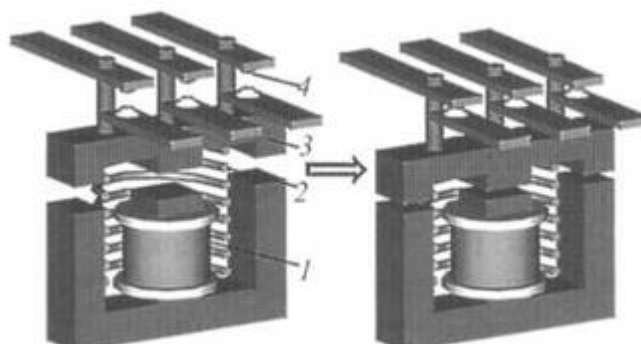


*Рис.12.16. Схема конструкции трехфазного контактора:*

*1 — катушка; 2 — пружина; 3 — подвижная часть; 4 — замыкающиеся силовые контакты*

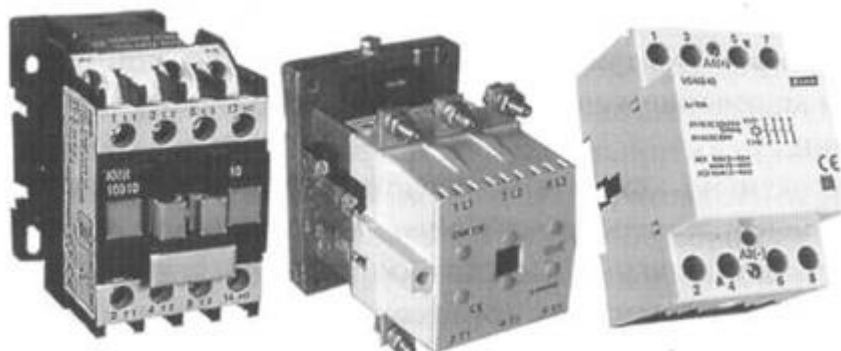


*Рис.12.17. Конструкционный вид контакторов*

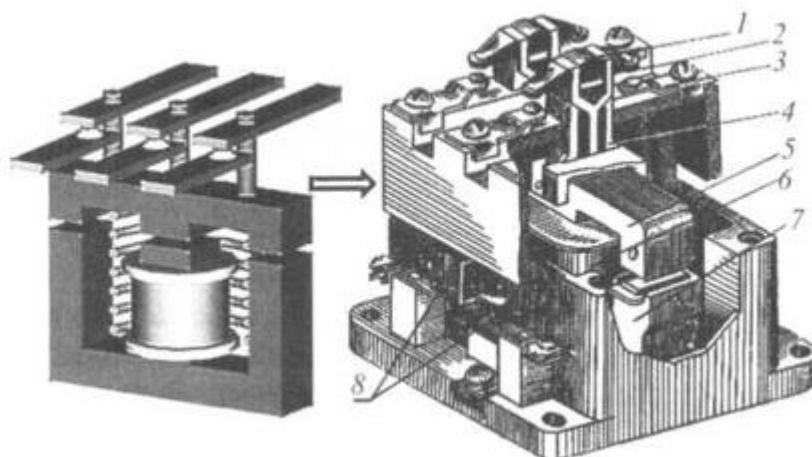


*Рис.12.18. Магнитный пускатель серии ПМЕ*

Рассмотрим устройство магнитного пускателя серии ПМЕ (рис. 12.18). Внутри корпуса пускателя размещена электромагнитная система, включающая в себя неподвижную Ш-образную часть сердечника из электротехнической стали 7 и обмотку 6, намотанную на катушку. Подвижная часть сердечника 5 (якорь) соединена с пластмассовой траверсой 4, на которой смонтированы контактные мостики 2 с подвижными контактами. Плавность замыкания контактов и необходимое усилие нажатия обеспечиваются контактными пружинами 1. Неподвижные контакты припаяны к контактным пластинам 3, снабженным винтовыми зажимами для присоединения проводов внешней цепи. Кроме главных контактов пускатели имеют дополнительные (блокировочные) контакты 8, расположенные на боковых поверхностях аппарата.

Принцип действия магнитного пускателя заключается в следующем: при включении пускателя по катушке проходит электрический ток сердечник намагничивается и притягивает якорь, при этом главные контакты замыкаются, по главной цепи протекает ток. При отключении пускателя катушка обесточивается, под действием возвратной пружины якорь возвращается в исходное положение, главные контакты размыкаются. При отключении магнитного пускателя вследствие перебоев в электроснабжении размыкаются все его контакты, в том числе и вспомогательные. При появлении напряжения в сети пускатель не включается до тех пор, пока не будет нажата кнопка «Пуск». То же происходит, если напряжение в сети снижается до 50—60 % от номинального.

На принципиальных электрических схемах условные графические обозначения основных элементов контактора и магнитного пускателя обозначаются, как показано на рис. 12.19.

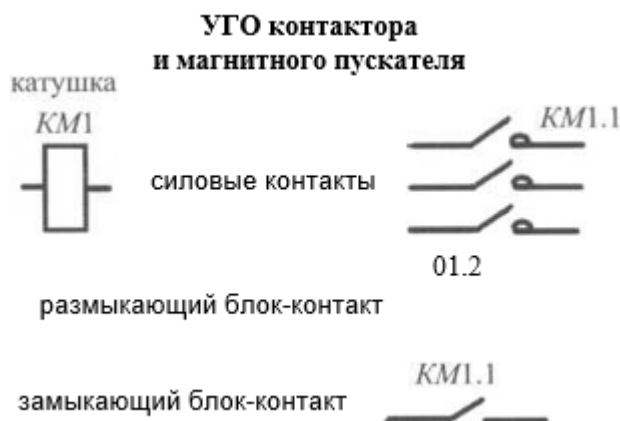


*Рис. 12.19. Условные графические обозначения основных элементов контактора и магнитного пускателя*

### 12.9. Электропривод. Основные понятия.

**Электрический привод (электропривод)** — электромеханическая система, преобразующая электрическую энергию в механическую, предназначенная для приведения в движение исполнительных механизмов рабочих машин.

Современный электропривод — совокупность множества электромашин, аппаратов и систем управления ими. Является основным потребителем электрической энергии (до 60 %) и главным источником механической энергии в промышленности.

Основная функция электропривода — приводить в движение рабочий механизм и изменять его режим работы в соответствии с требованиями технологического процесса.

Для выполнения этой функции электропривода должно быть выдержано определенное соответствие между механическими свойствами электродвигателя и рабочего механизма. Рабочий орган механизма реализует подведенную к нему механическую энергию в полезную работу. Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу сопровождается потерями, причиной возникновения которых является трение в подшипниках, направляющих, зацеплениях и т. д.

Для удобства выбора электродвигателя момент или усилие, создаваемые рабочим органом, и потери в передачах приводят к моменту на валу двигателя. Мощность на валу электродвигателя  $P$  равна сумме мощности рабочего органа  $P_{po}$  и мощности потерь в передаче  $\Delta P$ .

$P = P'_{po} + \Delta P$ , где  $P'_{po} = \frac{P_{po}}{i}$  — мощность, приведенная к валу двигателя,  $i$  — передаточное число редуктора.

С учетом КПД передачи  $\eta_{пер}$  мощность на валу двигателя  $P$ , и момент  $M$  определяются по выражениям

$$P = \frac{P_{po}}{\eta_{пер}}$$

$$M = \frac{M_{po}}{\eta_{пер}}$$

Мощность электродвигателей определяется нагрузкой производственных механизмов и режимом их работы. В зависимости от характера и продолжительности рабочего цикла установлены три основных режима работы: *продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный*. Если во время рабочего цикла мощность остается постоянной, то режим называют *режимом постоянной нагрузки*, а если она изменяется *режимом переменной нагрузки*. На рис. 12.20 представлены графики нагрузки для трех режимов работы при постоянной нагрузке.

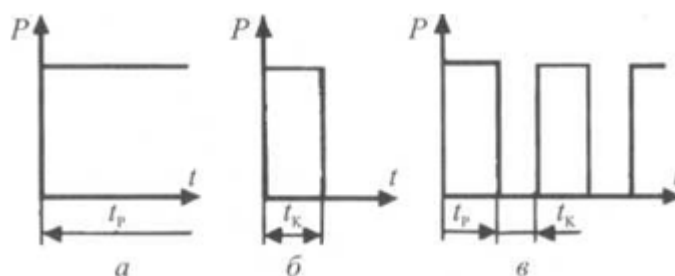


Рис.12. 20. Режимы работы электродвигателей: а — продолжительный; б — кратковременный; в — повторно-кратковременный

Повторно-кратковременный режим характеризуется величиной относительной продолжительности включения (ПВ):

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\%$$

где  $t_p$  — время работы электродвигателя;  $t_0 = t_k$  — время паузы.

Стандартные значения ПВ равны 15, 25, 40 и 60 % и указываются на электродвигателях, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы.

При кратковременном режиме работы на двигателях указывают продолжительность кратковременной работы  $t_k$ .

**Классификация электроприводов.** По количеству и связи исполнительных, рабочих органов электропривод может быть:

- групповым, в котором один двигатель приводит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов или группу рабочих органов одного механизма. В таком приводе кинематическая схема оказывается сложной и громоздкой, а сам привод неэкономичным, поэтому в настоящее время он находит лишь ограниченное применение;
- индивидуальным, в котором рабочий исполнительный орган приводится одним самостоятельным двигателем, приводом. Индивидуальный электропривод существенно упрощает кинематическую схему механизма, повышает экономичность и позволяет в ряде случаев встраивать электродвигатель непосредственно в механизм, что уменьшает его металлоемкость;

- взаимосвязанным, в котором рабочие органы одного механизма приводятся в движение несколькими электродвигателями. Взаимосвязанный электропривод может состоять из нескольких индивидуальных электроприводов. Во взаимосвязанном приводе возможна работа нескольких электродвигателей на один рабочий орган, что позволяет снизить усилия в рабочем органе и передаче, распределить их в механизме более равномерно, избежать перекосов и т. д.

По *типу управления* электроприводы классифицируются на:

- ♦ неавтоматизированный — управляется с непосредственным участием человека;
- ♦ автоматизированный, управляемый путем автоматического регулирования параметров и величин;
- ♦ программно-управляемый, функционирующий посредством специализированной управляющей вычислительной машины в соответствии с заданной программой;
- ♦ следящий, автоматически отрабатывающий перемещение исполнительного органа рабочего механизма с заданной точностью в соответствии с произвольно меняющимся сигналом управления;
- ♦ позиционный, автоматически регулирующий положение исполнительного органа рабочего механизма;
- ♦ адаптивный, автоматически избирающий структуру или параметры устройства управления с целью установления оптимального режима работы.

По *характеру движения* электроприводы классифицируются на:

- ♦ приводы с вращательным движением;
- ♦ приводы с линейным перемещением;
- ♦ приводы, подвижные части которых в установившемся режиме находятся в состоянии дискретного движения.

По *наличию и характеру передаточного устройства* электропривод может быть:

- ♦ редукторным;
- ♦ электрогидравлическим (с передаточным гидравлическим устройством);
- ♦ магнитогидродинамическим (с преобразованием электрической энергии в энергию движения токопроводящей жидкости).

По *роду тока* электропривод бывает:

- ♦ переменного тока;
- ♦ постоянного тока;
- ♦ дискретный (импульсный).

Качество работы современного электропривода во многом определяется правильным выбором используемого электрического двигателя, что, в свою очередь, обеспечивает продолжительную надежную работу электропривода и

высокую эффективность технологических и производственных процессов в промышленности, на транспорте, в строительстве и других областях.

При выборе электрического двигателя для привода производственного механизма руководствуются следующими рекомендациями:

- ♦ исходя из технологических требований, производят выбор электрического двигателя по его техническим характеристикам (по роду тока, номинальным напряжению и мощности, частоте вращения, виду механической характеристики, продолжительности включения, перегрузочной способности, пусковым, регулировочным и тормозным свойствами др.), а также конструктивное исполнение двигателя по способу монтажа и крепления; исходя из экономических соображений, выбирают наиболее простой, экономичный и надежный в эксплуатации двигатель, не требующий высоких эксплуатационных расходов и имеющий наименьшие габариты, массу и стоимость;
- ♦ исходя из условий окружающей среды, в которых будет работать двигатель, а также из требований безопасности работы выбирают конструктивное исполнение двигателя по способу защиты.

Правильный выбор типа, исполнения и мощности электрического двигателя определяет не только безопасность, надежность, экономичность работы и длительность срока службы двигателя, но и технико-экономические показатели всего электропривода в целом.

#### 12.10. Управление электроприводом.

Системы управления электроприводом состоят из типовых узлов, выполняющих отдельные функции.

Системы управления подразделяются на два вида. К первому виду относятся *разомкнутые системы*, обеспечивающие автоматизацию процессов пуска, торможения, изменения скорости, реверса, защиту и т. д., ко второму виду — *замкнутые системы управления*, в которых используются различные обратные связи: по скорости, ЭДС, току и т. д. Обратные связи совместно с задающим (управляющим) сигналом позволяют формировать статические и динамические характеристики электроприводов в соответствии с заданными технологическими требованиями.

Важным условием обеспечения правильной и непрерывной работы электроприводов является выбор схемы управления. В разомкнутых системах управления используют несколько способов дистанционного управления механизмами. Среди них чаще всего применяются реле, электромагнитные контакторы и пускатели, полупроводниковые элементы.

На рис. 12.21 представлена принципиальная схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и катушками магнитных пускателей на 380 В.

Для реверсивного управления асинхронным двигателем в данной схеме используется два магнитных пускателя *KM1* и *KM2*.

В зависимости от направления вращения пуск асинхронного двигателя производится путем нажатия на кнопку *SB2* «Вправо» или *SB3* «Влево». При этом образуется путь для прохождения тока через соответствующую катушку магнитного пускателя *KM1* или *KM2*. На катушку пускателя будет подано напряжение, его подвижный якорь притянется к сердечнику, в результате замкнутся силовые контакты магнитного пускателя *KM1* или *KM2.1*. Через них на обмотку статора асинхронного двигателя будет поступать трехфазный ток. Одновременно с замыканием силовых контактов замкнется нормально разомкнутый блок — контакт магнитного пускателя *KM1.2* или *KM2.2* и зашунтирует пусковую кнопку *SB2* или *SB3*, что позволяет отпускать ее после кратковременного нажатия. Двигатель отключается при нажатии на кнопку *SB1* «Стоп», размыкающий контакт которой разрывает цепь питания катушки магнитного пускателя.

Если напряжение снизится до значения, меньшего  $0,8U_{ном}$ , двигатель отключается от сети, так как магнитный поток, создаваемый катушкой пускателя при таком напряжении, недостаточен для удержания якоря пускателя во включенном состоянии.

Автоматический выключатель *QFI* защищает силовую цепь от коротких замыканий. Блокирующие контакты *KM1.3* и *KM2.3*, исключают короткое замыкание в силовой цепи. Тепловое реле *KK1* защищает двигатель от длительных перегрузок, превышающих номинальную нагрузку на 10—20 %. При срабатывании теплового реле его нормально замкнутый контакт *KK1.1* размыкается и разрывает цепь питания катушки магнитного пускателя.

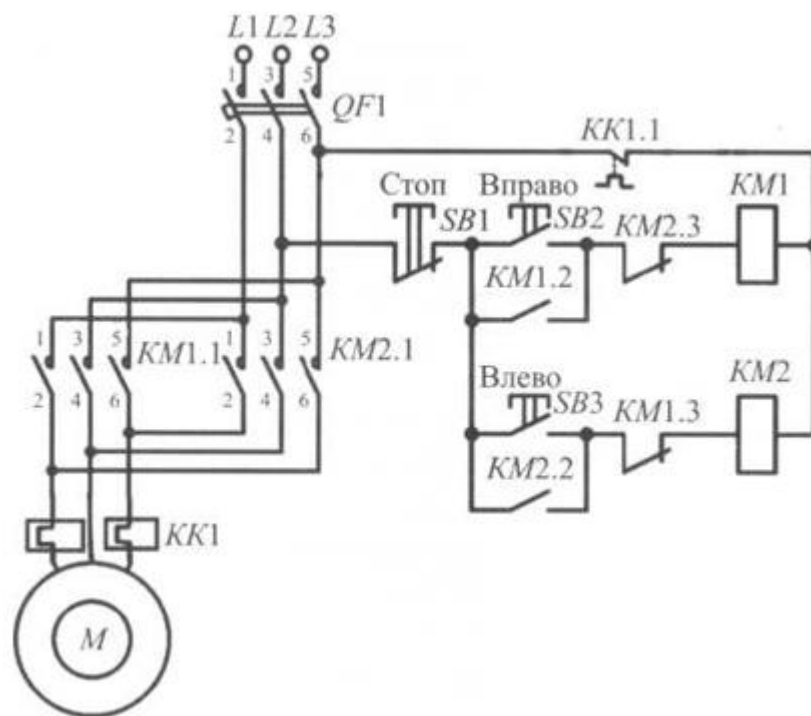


Рис. 12.21. Принципиальная схема реверсивного управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором

Для торможения асинхронного электродвигателя применяют различные способы.

Если необходимо затормозить двигатель после отключения его от сети, то применяют *динамическое торможение*. Для этого на обмотку статора через контактор подают постоянное напряжение от сети постоянного тока или от сети переменного тока через полупроводниковый выпрямитель.

Для быстрого торможения асинхронного двигателя используется *режим противовключения*. При помощи контактора подключают обмотку статора к сети таким образом, что поле статора вращается в сторону, противоположную направлению вращения ротора, что приводит к процессу торможения противовключением.

При управлении асинхронным двигателем переменного тока широкое применение нашли *тиристорные регуляторы напряжения (ТРН)*, которые входят в состав устройств плавного пуска электродвигателя.

**Устройство плавного пуска** — электротехническое (электронное) устройство, используемое для плавного пуска асинхронных электродвигателей с «вентиляторной» (квадратично зависимой от скорости) характеристикой нагрузочного момента, которое позволяет во время запуска удерживать параметры двигателя (тока, напряжения и т. д.) в безопасных пределах. Его применение обеспечивает ограничение скорости нарастания и значения пускового тока путем плавного нарастания напряжения на обмотках статора от нуля до номинального значения в течение заданного времени. Это позволяет снизить вероятность перегрева двигателя, устраняет рывки в механических

приводах, что в результате повышает срок службы и электродвигателя, и его привода.

Схема включения двигателя с помощью тиристорного регулятора напряжения представлена на рис. 12.22.

Устройство, выполненное по принципу тиристорного регулятора напряжения, обеспечивает ограничение скорости нарастания и значения пускового тока электродвигателя изменением углов отпирания тириستоров при помощи системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

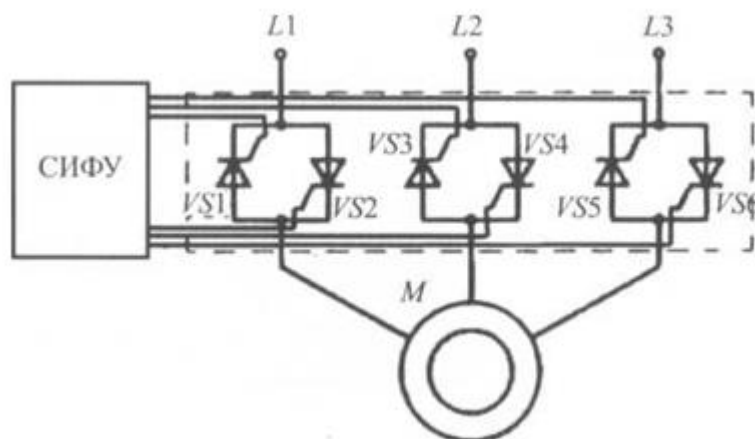


*Рис. 12.22. Схема включения электродвигателя с помощью тиристорного регулятора напряжения*

В тиристорном регуляторе напряжения в каждый фазный провод включаются встречно-параллельно два тиристора, один из которых работает условно в положительный полупериод напряжения сети, а другой — в отрицательный. Напряжение на двигателе, подаваемое с тиристорного регулятора напряжения, не является синусоидальным, его можно представить как среднее напряжение, которое возможно корректировать, изменяя продолжительность работы тиристора в течение полупериода. Пусковой ток увеличивается плавно с заданным токоограничением, не создавая ударных электромагнитных моментов, отрицательно сказывающихся на электродвигателе и механизме.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите об устройстве и принципе действия электромагнитного реле.
2. Расскажите об устройстве и принципе действия электромагнитного выключателя-автомата.
3. Для чего служат плавкие предохранители?
4. Расскажите об устройстве и принципе действия контактора.
5. Для чего предназначены магнитные пускатели?
6. Каково устройство и принцип работы теплового реле?
7. Какие электрические аппараты защищают электрические цепи от коротких замыканий и перегрузок?
8. Назначение герконов

9. Назовите аппараты управления
10. Электропривод. Основные понятия.
11. Системы управления электроприводом

### Часть 3. Автоматические системы управления в дорожно-строительном комплексе

## Глава 13. Объекты управления. Системы автоматического управления

### 13.1. Иерархичность объектов управления (ОУ)

Иерархичность объектов управления (ОУ) (аппарат, линия, цех, предприятие) порождает иерархию систем управления (PLC/DCS, SCADA, MES, ERP-системы) (рис. 13.1).

**Термин ERP** или *Enterprise resource planning*. С самого начала ERP системы позиционировались на рынке как системы, которые помимо решения задач планирования ресурсов, решают также вопросы организации данных и оптимизации процессов, связанных с функционированием бэк-офиса, как например, управление запасами, продажами, ценообразованием, ведение бухгалтерского учета и т.д. Помимо термина ERP, активно используются определения «Система управления предприятием», «Интегрированная система управления предприятием», и по сути, все они описывают ERP системы.



Рис. 13.1. Соответствие уровней объекта управления и АСУ

**Термин ERP или *Enterprise resource planning*.** С самого начала ERP системы позиционировались на рынке как системы, которые помимо решения задач планирования ресурсов, решают также вопросы организации данных и оптимизации процессов, связанных с функционированием бэк-офиса, как например, управление запасами, продажами, ценообразованием, ведение бухгалтерского учета и т.д. Помимо термина ERP, активно используются определения «Система управления предприятием», «Интегрированная система управления предприятием», и по сути, все они описывают ERP системы.

**MES (Manufacturing Execution System)** — производственная исполнительная система. MES — это специализированные программные комплексы, которые предназначены для решения задач оперативного планирования и управления производством. Системы данного класса призваны решать задачи синхронизации, координировать, анализировать и оптимизировать выпуск продукции в рамках определенного производства. Использование MES как специального промышленного софта, позволяет значительно повысить фондоотдачу технологического оборудования и, в результате, увеличить прибыль предприятия даже в условиях отсутствия дополнительных вложений в производство. MES-системы являются промышленными комплексными либо программными средствами, работающими в среде мастерских или производственных предприятий.

**SCADA (расшифровка: Supervisory Control And Data Acquisition)** — диспетчерское управление и сбор данных, программный пакет, предназначенный для сбора информации с различных физических датчиков в реальном времени, для обработки архивируемых параметров и отображения данных на экране монитора, телефона или планшета.

**Распределённая система управления (англ. Distributed Control System, DCS)**— система управления технологическим процессом, отличающаяся построением распределённой системы ввода-вывода и децентрализацией обработки данных. Основным отличием PCY от обычной SCADA-системы является глубокая интеграция средств разработки кода для уровня визуализации и уровня управления. Например, изменение в алгоритме управления процессом автоматически дублируется в программе отображения этого процесса.

В PCY значительную роль играют контуры регулирования (ПИД-регуляторы).

Требования к современной PCY:

1. Отказоустойчивость и безопасность.
2. Простота разработки и конфигурирования.
3. Поддержка территориально распределённой архитектуры.
4. Единая конфигурационная база данных.

## 5. Развитый человеко-машинный интерфейс.

Несмотря на содержание нескольких процессоров в распределенных системах существуют различные способы их организации. Обычно компьютеры подразделяются на две группы. Системы, которые используют память совместно, называются *мультипроцессорами*, а работающие каждый со своей памятью — *мультикомпьютерами*. Основная разница между ними состоит в том, что мультипроцессоры имеют единое адресное пространство, совместно используемое всеми процессорами. В мультикомпьютерах каждая машина использует свою собственную память. Типичный пример такой системы — несколько персональных компьютеров, объединенных в сеть.

### 13.2. Эскалаторы. Устройства безопасности.

Эскалаторами называют наклонные цепные конвейеры, предназначенные для перемещения людей. Их делят на поэтажные и тоннельные. Первые используют для перемещения людей между этажами общественных зданий, вторые — для подъема и опускания пассажиров в метрополитене.

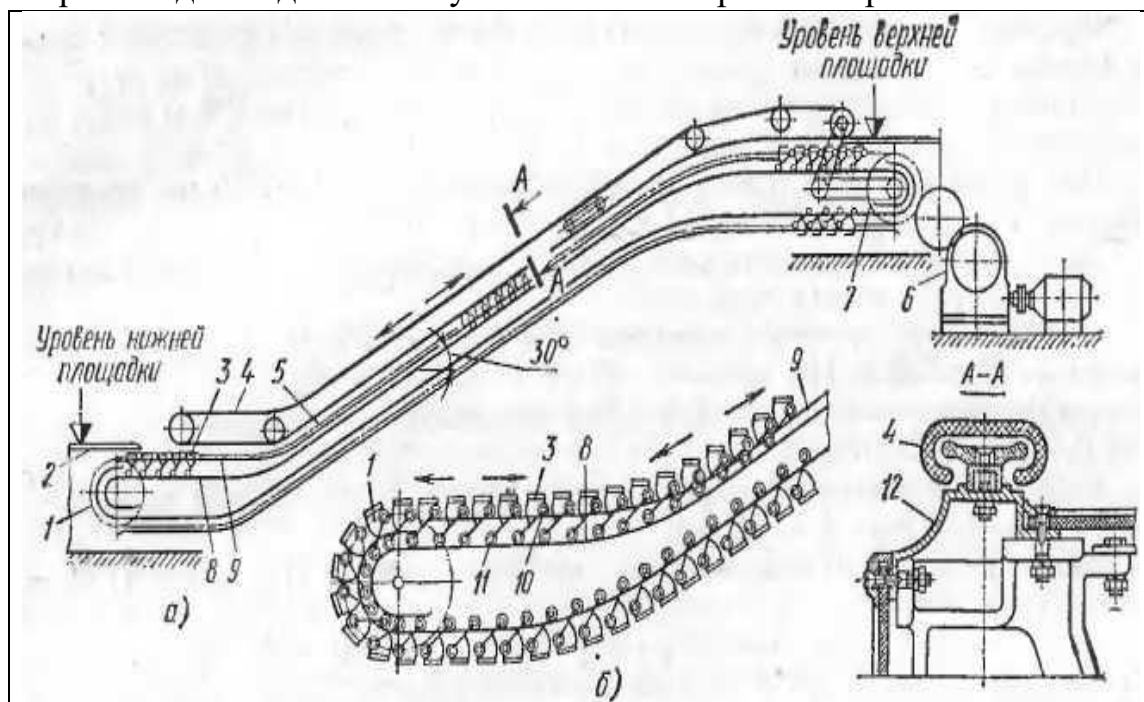


Рис.13.2. Эскалатор:

*а* — кинематическая схема; *б* — схема прохождения ступеней по направляющим

**Устройство и основные параметры.** Эскалаторы бывают обычно с одной (рис. 13.2) и в исключительных случаях с двумя рабочими ветвями. Ступень эскалатора снабжена двумя парами колес (бегунков): рабочими (основными) *10* (рис.13.2, *б*), насаженными на оси, которые шарнирно связаны с тяговыми цепями *5* (рис.13.2, *а*), и холостыми (вспомогательными *11*, рис. 13.2, *б*). Тяговые цепи приводятся в движение приводом *б* (рис.13.2, *а*) через приводные

звездочки 7, насаженные на приводной вал, называемый главным. Натяжение цепей обеспечивают натяжные устройства с натяжными звездочками 1. На всех участках рабочей ветви трассы, как горизонтальных, так и наклонных, независимо от угла наклона к горизонту, настилы ступеней остаются горизонтальными. Это достигается изменением расстояния между направляющими путями (рельсами) 9 и 8 (рис.13.2, б) рабочих и холостых колес ступеней при переходе с горизонтального участка на наклонный и обратно. Для безопасности пассажиров при спуске с полотна настилы ступеней выполнены рифлеными, а входные площадки 2 сделаны с гребенками (рис. 1, а). Для удобства входа на полотно и обеспечения устойчивого положения на нем каждый эскалатор снабжают двумя поручневыми установками 4, расположенными по обеим сторонам полотна. Направляющие рельсы 9 и 8 для рабочих и холостых колес прикреплены к металлоконструкции, собранной из отдельных сварных секций. Все элементы эскалатора, кроме ступеней и поручней на его рабочей ветви, а также входных площадок, закрыты балюстрадой 12, изготавливаемой из декоративных металлических профилей и деревянных щитов.

Угол наклона полотна эскалатора к горизонту составляет  $30 \dots 35^\circ$ . Такие углы обеспечивают оптимальное соотношение глубины, шага и высоты ступеней. У эскалаторов отечественного производства принят угол наклона  $30^\circ$ , при котором глубина и шаг ступеней равны 400 ... 405 мм, высота — 200 мм. С увеличением угла наклона высота ступеней возрастает, что затрудняет пользование эскалатором как лестницей, например, при подъеме пассажиров по полотну в случае вынужденной остановки. Появляется также чувство высоты, что небезопасно для пассажиров. С уменьшением угла наклона удлиняется полотно, возрастает стоимость эскалатора и строительного сооружения, что нерационально.

### **Размеры**

Площадки входа-выхода у эскалатора составляют от 80 до 120 см. Шаг и глубина ступеней - от 40 до 40,5 см. Ширина ступеней у поэтажных моделей составляет 50-100 см, а у тоннельных - 75-120 см. Высота ступеней составляет 10 см. Ширина полотна - от 58 до 110 сантиметров. Если эскалатор подъемный, с углом наклона, не достигающим шести градусов, тогда допустима ширина в 165 см. Наконец, длина определяется высотой помещения. Так, если подъем не более 65 м, то можно поставить всего одну конструкцию. Если же высота превышает данное значение, тогда придется делать два эскалатора.

Скорость полотна принимают в пределах 0,5 ... 1 м/с. При большем ее значении снижаются безопасность пользования эскалатором и коэффициент заполнения его полотна  $\varphi_s$  — отношение числа пассажиров, находящихся на полотне, к теоретически возможному его числу при заполнении всех ступеней. Ступени шириной 500 ... 700 мм рассчитаны на одного пассажира, шириной 900 ... 1000

мм — на двух; ступени на трех человек не делают, так как пассажир, стоящий между двумя другими, лишен возможности пользоваться поручнем, что снижает его безопасность.

Радиус кривизны направляющих верхнего криволинейного участка лестничного полотна составляет 4 ... 10 м, нижнего криволинейного участка — 2 ... 6 м.

### **Производительность эскалатора (чел./ч)**

$$Z = 3600 Z'_3 v \varphi_s / l_{\text{ст}}, (1)$$

ГДЕ  $Z'_3$  — РАСЧЕТНОЕ ЧИСЛО ПАССАЖИРОВ, РАЗМЕЩАЮЩИХСЯ НА ОДНОЙ СТУПЕНИ (КАК ПРАВИЛО,  $Z'_3 = 1$  ДЛЯ ЭСКАЛАТОРОВ ЗДАНИЙ И  $Z'_3 = 2$  ДЛЯ ЭСКАЛАТОРОВ МЕТРОПОЛИТЕНА);  $v$  — СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСТНИЧНОГО ПОЛОТНА, М/С;  $L_{\text{ст}} = 0,400 \dots 0,405$  М — ШАГ СТУПЕНЕЙ;  $\varphi_s$  — КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ПО ЭМПИРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ  $\varphi_s = 1,2 \dots 0,6$  И (ЗДЕСЬ  $v < 1$  М/С).

**Ступени.** Каркас 3 (рис.13.3, а) ступеней изготавливают сварным из прокатных профилей или литым из легких сплавов, настил б — из пластмассы или легких сплавов, подступенок 2 — из декоративной фанеры или подобно настилу — из легких сплавов. Наиболее изнашиваемую часть настила со стороны, обращенной к подступенку, выполняют в виде съемного козырька, заменяемого при износе. Колеса ступеней (рис.13.3, б—г) снабжают подшипниками качения с долгодействующей смазкой, которую не требуется заменять в период между капитальными ремонтами. Рабочие колеса (рис.13.3, б, в), воспринимающие большие нагрузки на верхнем криволинейном участке направляющих путей, имеют пластмассовый (рис.2, б) или комбинированный обод из резины и пластмассы. Более подходящие по шумовым характеристикам рабочие колеса с резиновым ободом (рис.2, в) недостаточно надежны, и их применяют лишь в эскалаторах малой высоты. Для снижения шума менее нагруженные холостые колеса (рис.13.3, г) изготавливают только с резиновым ободом.

**Тяговые цепи.** Пластинчатые втулочно-роликовые цепи (рис.13.4) снабжают специальными упорами 2, предотвращающими складывание цепи при обрыве. Они препятствуют повороту звеньев в направлении, противоположном направлению их поворота на звездочках. Складыванию цепи при обрыве в другом направлении препятствуют контршины, охватывающие контур цепи по всей его длине.

Валик б цепи в месте соединения с осью рабочего колеса ступени делают полым с отверстием под ось. В отдельных конструкциях валик цепи, выполненный удлиненным, является одновременно осью рабочего колеса.

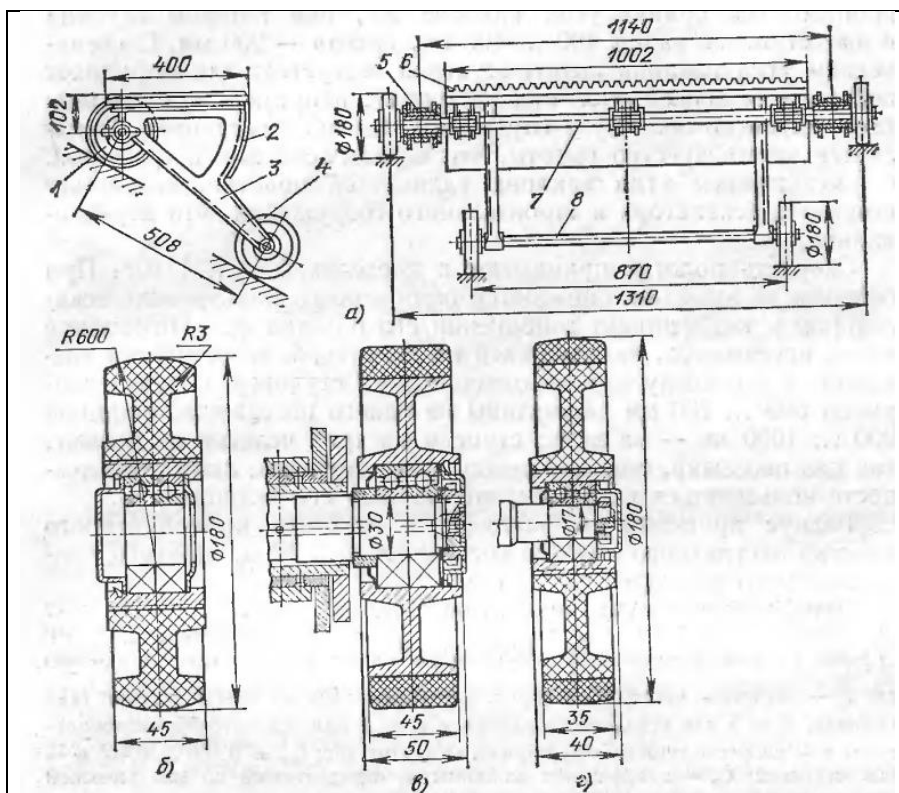


Рис. 13.3, Ступень эскалатора:

*а-общий вид; б—г колёса бегунки (б, в — рабочие с пластмассовым и резиновым ободом; г - холостое); 1 основное колесо; 2 — подступенок; 3 - каркас; 4 - вспомогательное колесо; 5 - тяговая цепь; 6 — настил; 7 и 8 оси колес*

**Привод.** Для эскалаторов используют привод редукторного типа односторонний, реже двусторонний. Привод имеет рабочий, установленный на главном валу, и аварийный тормоза. Последний срабатывает при нарушении кинематической связи между элементами привода. Для замедленного движения полотна при его техническом обслуживании, а также для размыкания аварийного тормоза применяют вспомогательные приводы.

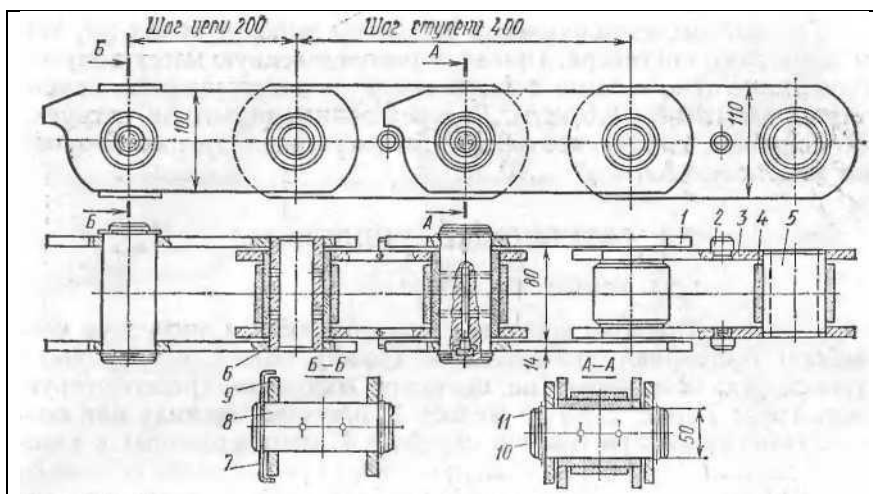


Рис.13.4 Тяговая цепь эскалатора

1 — наружная пластина; 2 — упор; 3 — внутренняя пластина; 4 — ролик; 5 — втулка; 6 - полый валик; 7 - стопорная шайба; 8 — соединительный валик; 9 — соединительная пластина; 10 - сплошной валик; 11 — пружинное кольцо

**Поручневая установка.** Поручневую установку выполняют в виде конвейера с узкой С-образной лентой, движущейся синхронно с лестничным настилом. Поручень изготавливают из высокопрочного бельтинга, покрытого с наружной стороны слоем резины.

В последнее время используют поручни, армированные тросами. В рабочей зоне, со стороны, обращенной к пассажирам, поручень перемещается по направляющим с плоскими опорными поверхностями и скругленными боковыми гранями, а в нерабочей зоне, скрытой под балюстрадой, на опорных роликах. Поручень приводится в движение фрикционным блоком с приводом от главного вала или от тяговой цепи.

**Натяжное устройство.** Для натяжения тяговой цепи в эскалаторах применяют пружинно-винтовые или грузовые устройства.

**Расчет эскалаторов.** При расчете эскалаторов необходимо руководствоваться Правилами устройства и безопасной эксплуатации эскалаторов.

Расчет тягово-несущих элементов эскалаторов выполняется аналогично расчету пластинчатых конвейеров. При определении расчетной нагрузки масса одного пассажира в соответствии с Правилами Госпромнадзора принимается равной 80 кг. Распределенную массу ходовой части (ступени и цепи) при этом принимают по аналогии с выполненными конструкциями или рассчитывают. Ориентировочно для тоннельного эскалатора с шириной ступеней 1000 мм она составляет 200 ... 275 кг/м. Коэффициент сопротивления движению тяговых цепей со ступенями принимают равным 0,025 ... 0,028.

Тяговый расчет поручневой установки выполняют так же, как и ленточного конвейера. При этом распределенную массу поручня принимают по аналогии с выполненными конструкциями ориентировочно 1,85 ... 2,5 кг/м.

Распределенная расчетная нагрузка от опирания пассажиров 50 Н/м, коэффициент трения поручня по направляющей 0,27 ... 0,37.

### **Устройства безопасности**

1. Защита при отсутствии фазы и ошибке фазы: при обнаружении отсутствия фазы или ошибки фазы эскалатор (траволатор) автоматически остановится.
2. Защита двигателя от перегрузки: при увеличении силы тока более чем на 15% эскалатор автоматически остановится.
3. Защита электрической цепи: автоматический разрыв электрической цепи для защиты основных компонентов эскалатора (траволатора) от короткого замыкания.
4. Защита устья поручня: если посторонний предмет попадет в отверстие поручня, эскалатор (траволатор) автоматически остановится.
5. Защита гребенок: если посторонний предмет застрянет между зубьями гребенки, эскалатор (траволатор) автоматически остановится.
6. Контроль прогиба ступеней: при выявлении чрезмерного прогиба ступени эскалатор прекратит работу до встречи этой ступени с гребенкой.
7. Защита ведущей цепи от разрыва: эскалатор (траволатор) автоматически остановится при чрезмерном растяжении или разрыве цепи привода.
8. Защита в случае разрыва цепи ступеней: эскалатор автоматически остановится при чрезмерном растяжении или разрыве цепи ступеней.
9. Защита от превышения скорости: при превышении установленной скорости движения эскалатор (траволатор) автоматически остановится.
10. Защита от изменения направления движения: при непредвиденном изменении направления движения эскалатор (траволатор) автоматически остановится.
11. Линия безопасности: Желтая линия безопасности из синтетической резины расположена по переднему краю ступеней и по обеим сторонам полотна эскалатора, чтобы пассажиры не наступили на кромку ступеней и не стояли слишком близко к боковой панели. Линия безопасности, нанесенная по обеим сторонам ступеней, выступает над полотном эскалатора (на траволатор линию безопасности наносят желтой краской).
12. Кнопка аварийной остановки: при нажатии этой кнопки эскалатор (траволатор) прекращает движение.
13. Защита боковой панели: если посторонний предмет попадет в зазор между боковой панелью и ступенями, эскалатор автоматически остановится.
14. Система торможения: при падении напряжения или срабатывании любого устройства безопасности пружинный механизм приводит в действие систему торможения, чтобы эскалатор (траволатор) прекратил работу.

15. Инспекционный переключатель безопасности: устройство безопасности, предотвращающее пуск эскалатора во время осмотра и технического обслуживания.

16. Подсветка ступеней. Подсветка монтируется на входе и выходе с эскалатора по краю лестничного полотна для напоминания пассажирам о необходимости проявлять внимательность и осторожность.

17. Предупреждающий звонок: звонок, оповещающий о начале движения, который напоминает пассажирам о необходимости проявлять внимательность и осторожность.

18. Защита от разрыва поручня: при разрыве поручня эскалатор автоматически остановится.

19. Датчик скорости поручня: если поручень движется медленнее полотна на определенную величину, эскалатор (траволатор) прекратит работу.

20. Щетка боковой панели: вспомогательное устройство безопасности. Щетка монтируется между боковой панелью и ступеням, чтобы избежать контакта пассажиров с неподвижной боковой панелью (область применения не ограничивается эскалаторами).

21. Независимая резервная система контроля: делает работу эскалатора еще более безопасной и надежной.

22. Блокировка опускания ступеней: устройство, обеспечивающее безопасность пассажиров.

23. Блокировка поручней: при осмотре и техническом обслуживании эскалатора поручни останавливаются и блокируются.

24. Датчик тормозного пути: при превышении тормозного пути в 1,2 раза и более по сравнению с величиной, установленной национальным стандартом, эскалатор экстренно блокируется, а затем перезапускается. При необходимости проверьте тормозную систему и примите меры по устранению неисправности перед ручным перезапуском.

25. Датчик срабатывания тормоза: датчик срабатывания тормоза предотвращает безостановочную работу двигателя, позволяя избежать риска возгорания.

#### **Дополнительные устройства безопасности**

26. Аварийный тормоз: предохраняет от проскальзывания и обеспечивает безопасность пассажиров в случае разрыва цепи привода или поломки основного тормоза. Высота подъема должна составлять до 6 м, это стандартное значение.

27. Противопожарная штора: при срабатывании этого устройства эскалатор (траволатор) прекращает движение. Устройство устанавливается на входных площадках эскалатора (траволатора).

28. Дренаж нижнего машинного помещения: система дренажа автоматически включается, когда уровень воды превышает установленный (для эскалаторов, установленных вне зданий).

### 13.3. Инжекторная система ДВС

На всех современных автомобилях с бензиновыми моторами используется инжекторная система подачи топлива, поскольку она является более совершенной, чем карбюраторная несмотря на то, что она конструктивно более сложная.

Инжекторный двигатель – не новь, но широкое распространение он получил только после развития электронных технологий. Все потому, что механически организовать управление системой, обладающей высокой точностью работы было очень сложно. Но с появлением микропроцессоров это стало вполне возможно.

Инжекторная система отличается тем, что бензин подается строго заданными порциями принудительно в коллектор (цилиндр).

#### **Устройство ДВС**

Основным достоинством, которым обладает инжекторная система питания, является соблюдение оптимальных пропорций составных элементов горючей смеси на разных режимах работы силовой установки. Благодаря этому достигается лучший выход мощности и экономичное потребление бензина.

#### **Устройство системы**

Инжекторная система подачи топлива состоит из электронной и механической составляющих. Первая контролирует параметры работы силового агрегата и на их основе подает сигналы для срабатывания исполнительной (механической) части.

К электронной составляющей относится микроконтроллер (электронный блок управления) и большое количество следящих датчиков:

- лямбда-зонд;
- положения коленвала;
- массового расхода воздуха;
- положения дроссельной заслонки;
- детонации;
- температуры ОЖ;
- давления воздуха во впускном коллекторе.

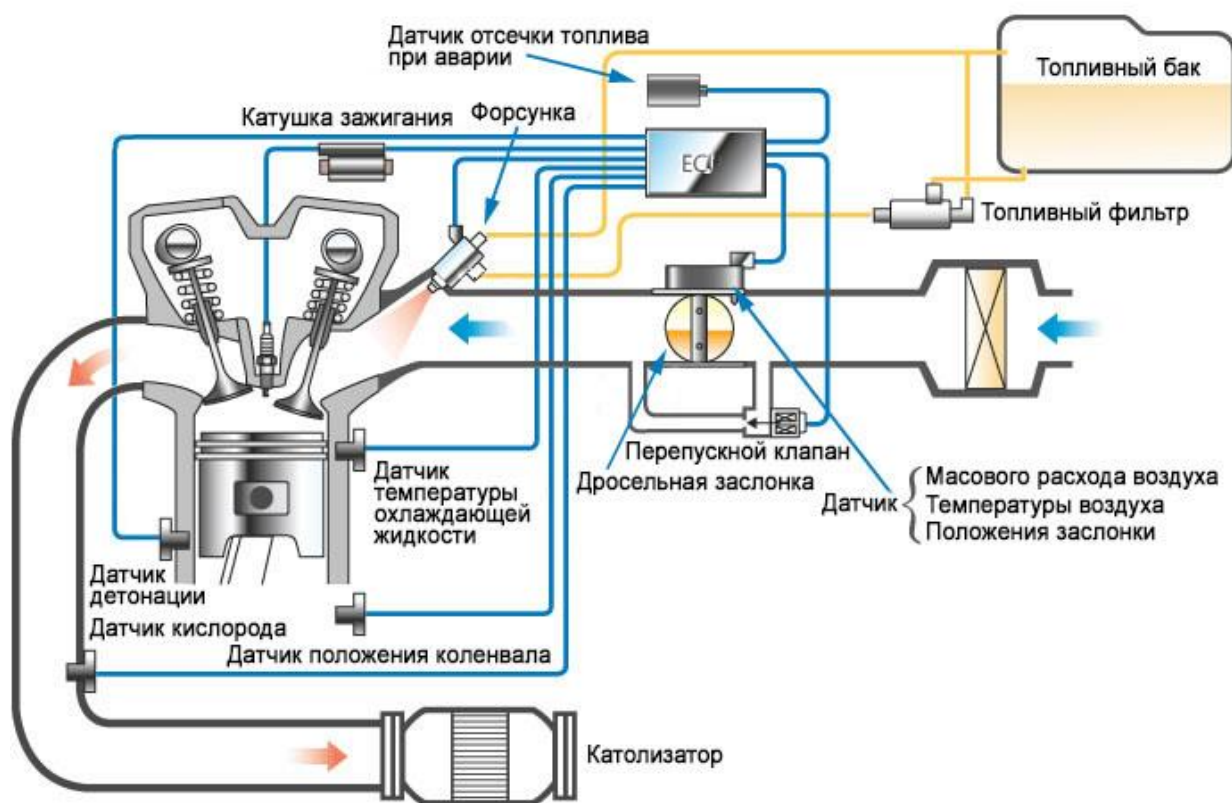


*Рис.13.5. Инжекторный двигатель*

Датчики системы инжектора

На некоторых авто могут иметься еще несколько дополнительных датчиков. У всех у них одна задача – определять параметры работы силового агрегата и передавать их на ЭБУ

Что касается механической части, то в ее состав входят такие элементы:

- бак;
- электрический топливный насос;
- топливные магистрали;
- фильтр;
- регулятор давления;
- топливная рампа;
- форсунки.
- Простая инжекторная система подачи топлива

### **Принцип работы**

Датчики собирают информацию о скорости вращения коленчатого вала, воздуха (поступившего в цилиндры, а также остаточной его части в отработанных газах), положения дросселя (связанного с педалью акселератора), температуры ОЖ. Эти данные датчики передают постоянно на электронный блок, благодаря чему и достигается высокая точность дозировки бензина.

Поступающую с датчиков информацию ЭБУ сравнивает с данными, внесенными в карты, и уже на основе этого сравнения и ряда расчетов осуществляет управление исполнительной частью. В электронный блок внесены так называемые карты с оптимальными параметрами работы силовой установки (к примеру, на такие условия нужно подать столько-то бензина, на другие – столько-то).

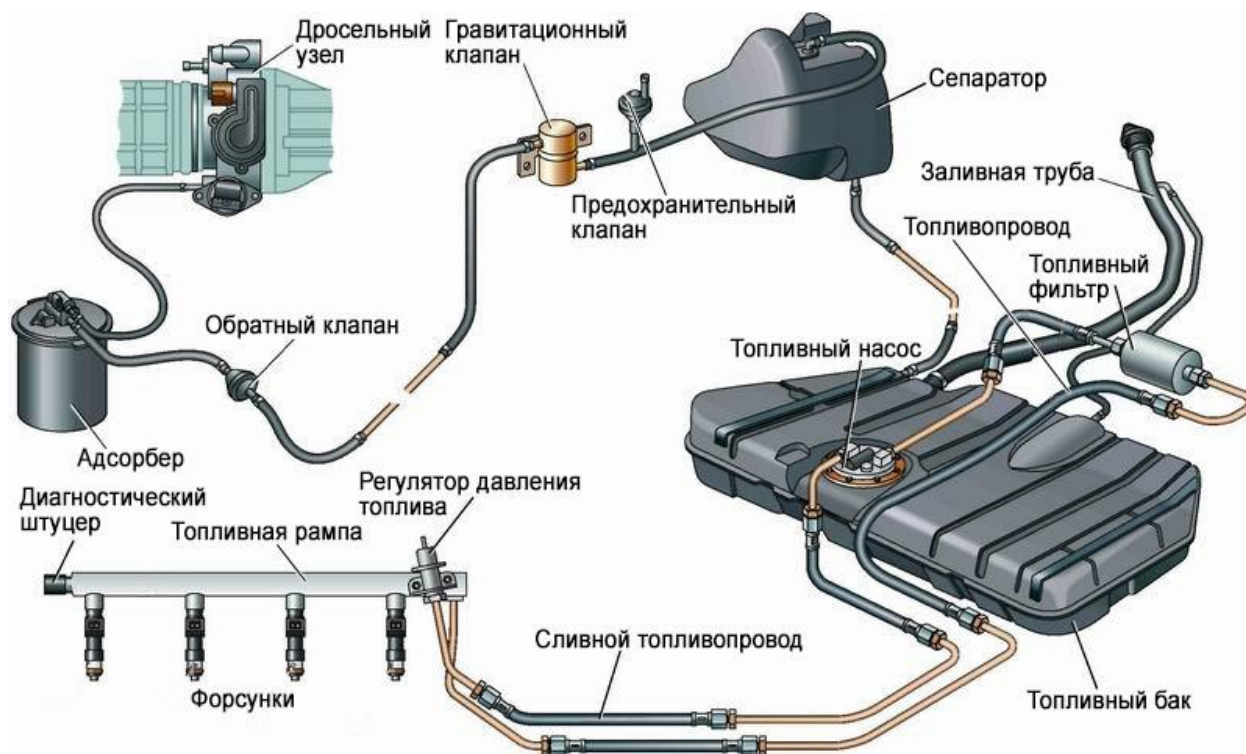


*Рис.13.6. Инжекторная система ДВС*

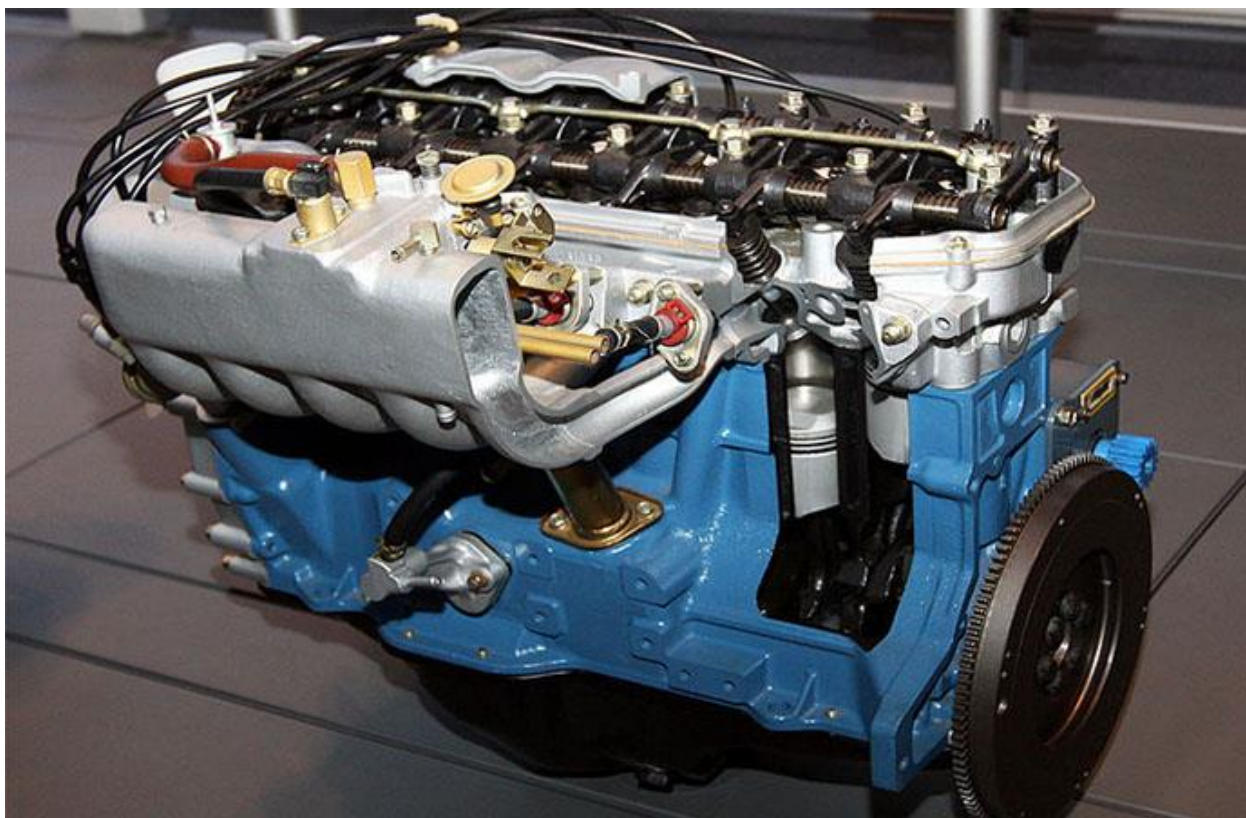


*Рис.13.7. Инжекторный двигатель Toyota 1973 года*

Чтобы было понятнее, рассмотрим более подробно алгоритм работы электронного блока, но по упрощенной схеме, поскольку в действительности при расчете используется очень большое количество данных. В целом, все это направлено на высчитывание временной длины электрического импульса, который подается на форсунки.

Поскольку схема – упрощенная, то предположим, что электронный блок ведет расчеты только по нескольким параметрам, а именно базовой временной длине импульса и двум коэффициентам – температуры ОЖ и уровне кислорода в выхлопных газах. Для получения результата ЭБУ использует формулу, в которой все имеющиеся данные перемножаются.

Для получения базовой длины импульса, микроконтроллер берет два параметра – скорость вращения коленчатого вала и нагрузку, которая может высчитываться по давлению в коллекторе.

| Обороты<br>(RPM) | Нагрузка |   |    |    |    |
|------------------|----------|---|----|----|----|
|                  | 1        | 2 | 3  | 4  | 5  |
| 1000             | 1        | 2 | 3  | 4  | 5  |
| 2000             | 2        | 4 | 6  | 8  | 10 |
| 3000             | 3        | 6 | 9  | 12 | 15 |
| 4000             | 4        | 8 | 12 | 16 | 20 |

К примеру, обороты двигателя составляют 3000, а нагрузка 4. Микроконтроллер берет эти данные и сравнивает с таблицей, внесенной в карту. В данном случае получаем базовую временную длину импульса 12 миллисекунд.

Но для расчетов нужно также учесть коэффициенты, для чего берутся показания с датчиков температуры ОЖ и лямбда-зонда. К примеру, температура составляет 100 град, а уровень кислорода в отработанных газах составляет 3. ЭБУ берет эти данные и сравнивает с еще несколькими таблицами. Предположим, что температурный коэффициент составляет 0,8, а кислородный – 1,0.

| Датчик температуры ОЖ |             | Датчик кислорода |             |
|-----------------------|-------------|------------------|-------------|
| t°C                   | коэффициент | O <sub>2</sub>   | коэффициент |
| 0                     | 1,2         | 0                | 1           |
| 25                    | 1,1         | 1                | 1           |
| 50                    | 1,0         | 2                | 1           |
| 75                    | 0,9         | 3                | 1           |
| 100                   | 0,8         | 4                | 0,75        |

Получив все необходимые данные электронный блок проводит расчет. В нашем случае 12 множится на 0,8 и на 1,0. В результате получаем, что импульс должен составлять 9,6 миллисекунды.

Описанный алгоритм – очень упрощенный, на деле же при расчетах может учитываться не один десяток параметров и показателей.

Поскольку данные поступают на электронный блок постоянно, то система практически мгновенно реагирует на изменение параметров работы мотора и подстраивается под них, обеспечивая оптимальное смесеобразование.

Стоит отметить, что электронный блок управляет не только подачей топлива, в его задачу входит также регулировка угла зажигания для обеспечения оптимальной работы мотора.

Теперь о механической части. Здесь все очень просто: насос, установленный в баке, закачивает в систему бензин, причем под давлением, чтобы обеспечить принудительную подачу. Давление должно быть определенным, поэтому в схему включен регулятор.

По магистралям бензин подается на рампу, которая соединяет между собой все форсунки. Подающийся от ЭБУ электрический импульс приводит к открытию форсунок, а поскольку бензин находится под давлением, то он через открывшийся канал просто впрыскивается.

### **Виды и типы инжекторов**

Инжекторы бывают двух видов:

1. С одноточечным впрыском. Такая система является устаревшей и на автомобилях уже не используется. Суть ее в том, что форсунка только одна, установленная во впускном коллекторе. Такая конструкция не обеспечивала равномерного распределения топлива по цилиндрам, поэтому ее работа была сходной с карбюраторной системой.

2. Многоточечный впрыск. На современных авто используется именно этот тип. Здесь для каждого цилиндра предусмотрена своя форсунка, поэтому такая система отличается высокой точностью дозирования. Устанавливаться форсунки могут как во впускной коллектор, так и в сам цилиндр (инжекторная система непосредственного впрыска).

На многоточечной инжекторной системе подачи топлива может использоваться несколько типов впрыска:

1. Одновременный. В этом типе импульс от ЭБУ поступает сразу на все форсунки, и они открываются вместе. Сейчас такой впрыск не используется.

2. Парный, он же попарно-параллельный. В этом типе форсунки работают парами. Интересно, что только одна из них подает топливо непосредственно в такте впуска, у второй же такт не совпадает. Но поскольку двигатель – 4-тактный, с клапанной системой газораспределения, то несовпадение впрыска по такту на работоспособность мотора влияния не оказывает.

3. Фазированный. В этом типе ЭБУ подает сигналы на открытие для каждой форсунки отдельно, поэтому впрыск происходит с совпадением по такту.

Примечательно, что современная инжекторная система подачи топлива может использовать несколько типов впрыска. Так, в обычном режиме используется фазированный впрыск, но в случае перехода на аварийное функционирование (к примеру, один из датчиков отказал), инжекторный двигатель переходит на парный впрыск.

### **Обратная связь с датчиками**

Одним из основных датчиков, на показаниях которого ЭБУ регулирует время открытия форсунок, является лямбда-зонд, установленный в выпускной системе. Этот датчик определяет остаточное (не сгоревшее) количество воздуха в газах.



*Рис. 13.8. Лямбда-зонд от Bosch*

Благодаря этому датчику обеспечивается так называемая «обратная связь». Суть ее заключается вот в чем: ЭБУ провел все расчеты и подал импульс на форсунки. Топливо поступило, смешалось с воздухом и сгорело. Образовавшиеся выхлопные газы с не сгоревшими частицами смеси выводятся из цилиндров по системе отвода выхлопных газов, в которую установлен лямбда-зонд. На основе его показаний ЭБУ определяет, правильно ли были проведены все расчеты и при надобности вносит корректировки для получения оптимального состава. То есть, на основе уже проведенного этапа подачи и сгорания топлива микроконтроллер делает расчеты для следующего. Стоит отметить, что в процессе работы силовой установки существуют определенные режимы, при которых показания кислородного датчика будут некорректными, что может нарушить работу мотора или требуется смесь с определенным составом. При таких режимах ЭБУ игнорирует информацию с лямбда-зонда, а сигналы на подачу бензина он отправляет, исходя из заложенной в карты информации.

На разных режимах обратная связь работает так:

- **Запуск мотора.** Чтобы двигатель смог завестись, нужна обогащенная горючая смесь с увеличенным процентным содержанием топлива. И электронный блок это обеспечивает, причем для этого он использует заданные данные, и информацию от кислородного датчика он не использует;
- **Прогрев.** Чтобы инжекторный двигатель быстрее набрал рабочую температуру ЭБУ устанавливает повышенные обороты мотора. При этом он постоянно контролирует его температуру, и по мере прогрева корректирует состав горючей смеси, постепенно ее обедняя до тех пор, пока состав ее не станет оптимальным. В этом режиме электронный блок продолжает использовать заданные в картах данные, все еще не используя показания лямбда-зонда;

- Холостой ход. При этом режиме двигатель уже полностью прогрет, а температура выхлопных газов – высокая, поэтому условия для корректной работы лямбда-зонда соблюдаются. ЭБУ уже начинает использовать показания кислородного датчика, что позволяет установить стехиометрический состав смеси. При таком составе обеспечивается наибольший выход мощности силовой установки;
- Движение с плавным изменением оборотов мотора. Для достижения экономичного расхода топлива при максимальном выходе мощности, нужна смесь со стехиометрическим составом, поэтому при таком режиме ЭБУ регулирует подачу бензина на основе показания лямбда-зонда;
- Резкое увеличение оборотов. Чтобы инжекторный двигатель нормально отреагировал на такое действие, нужна несколько обогащенная смесь. Чтобы ее обеспечить, ЭБУ использует данные карт, а не показания лямбда-зонда;
- Торможение мотором. Поскольку этот режим не требует выхода мощности от мотора, то достаточно, чтобы смесь просто не давала остановиться силовой установке, а для этого подойдет и обедненная смесь. Для ее проявления показаний лямбда-зонда не нужно, поэтому ЭБУ их не использует.

Как видно, лямбда-зонд хоть и очень важен для работы системы, но информация с него используется далеко не всегда.

Напоследок отметим, что инжектор хоть и конструктивно сложная система и включает множество элементов, поломка которых сразу же сказывается на функционировании силовой установки, но она обеспечивает более рациональный расход бензина, а также повышает экологичность автомобиля. Поэтому альтернативы этой системе питания пока нет.

#### 13.4. Автоматизированные системы управления автогрейдером.

Автогрейдеры (рис. 13.9) широко используют в дорожно-строительной отрасли для:

- Строительство и ремонт дорожного покрытия.
- Формирование разных выемок.
- Очистка и уборка территории зимой.
- Выравнивание и перемешивание сыпучих смесей и материалов.
- Выравнивание плоскостей под различными углами.
- Прочистка кюветов и водоотводных канав.



*Рис.13.9 Автогрейдер*

Мало найдется дорожно-строительных машин, где от оператора требовалась бы такая высокая квалификация, как при управлении автогрейдером. И мало найдется таких дорожно-строительных машин, неэффективное использование которых может так сильно повлиять на общее замедление темпа строительных работ, как плохая работа автогрейдера.

Технологии автоматизированного управления дорожно-строительной техникой – любые, от систем автоматического управления движениями бульдозерного и грейдерного отвала (рис. 13.10) до систем нивелирования с GPS/ГЛОНАСС с программным обеспечением 3D-моделирования – значительно снижают планку требований к квалификации операторов тяжелой дорожно-строительной техники.



*Рис. 13.10. Система автоматического управления отвалом автогрейдера*

Система Machine Control TG63 для управления грейдером CHCNAV — это продукт, созданный для повышения качества и эффективности профилировочных, планировочных и отделочных земляных работ. Система использует высокоточное GNSS позиционирование и инерциальную технологию определения уклона (с частотой обновления 100 Гц) для измерения координат отвала грейдера в режиме реального времени. Определяется расстояние от проектной поверхности до отвала. Затем отправляется управляющий сигнал на электромагнитный клапан и отвал

грейдера управляется в автоматическом режиме. Технология собственной разработки - GR-Tech, обеспечивает точность выполняемых работ до  $\pm 2$  см и индекса сглаживания до 2 см / 4 м.

Особенности системы:

- Высокая точность позиционирования, использование технологии RTK для получения сантиметровой точности положения отвала.
- Отображение проекта в реальном времени на экране планшета и автоматическое управление отвалом вверх/вниз.
- Надежная конструкция достаточная для работы в сложных и суровых строительных условиях.
- Простота калибровки и диагностики системы оператором.
- Просто использовать – нажатием одной кнопки система переводится в автоматический режим.

GNSS-приемник - прибор, созданный для определения местоположения при помощи данных от глобальных спутниковых навигационных систем. Профессиональные GNSS-приемники делятся на несколько видов:

1. GNSS-приемники геодезического класса – наиболее распространенные и универсальные приборы. Как правило, объединяют в одном корпусе приемник GNSS-сигналов, GNSS-антенну, коммуникационные устройства (GSM/GPRS/UHF-модемы, Bluetooth/NFC/Wi-Fi-модули) и элементы питания. Благодаря достижению миллиметровой точности позиционирования подходят для производства большинства видов геодезических работ.
2. GNSS-приемники ГИС-класса – приборы, имеющие компактные размеры и невысокую (субметровую) точность позиционирования. Как правило, данные приборы интегрированы с КПК и работают под управлением геоинформационных программ. Основное назначение подобных устройств – сбор геопространственной информации для различных баз данных.
3. Интеграционные GNSS-приемники – оборудование, служащее для внедрения в программно-аппаратные комплексы. Назначение данных приборов – позиционирование каких-либо систем или механизмов. Как правило, построены по модульной схеме и не имеют собственной GNSS-антенны, коммуникационных устройств, блоков памяти и питания. Зачастую используются для организации референт-станций, внедрения в строительную технику.

Система «Профиль-30» предназначена для автоматической стабилизации рабочих органов строительных и дорожных машин по высотным отметкам, задаваемым копирными направляющими (шнуром; ранее обработанной поверхностью; плоскостью, образованной лучом лазера) и по углу наклона в поперечной плоскости – автономный канал с бортовым датчиком углового положения.

Установленная на автогрейdere, она позволяет обеспечивать высокое качество работ при планировке верха дорожного полотна и слоев дорожной одежды, оснований взлетно посадочных полос, балластных слоев железнодорожного полотна, нарезания кюветов с заданными продольными уклонами, требующих высокого качества по ровности и минимальных отклонений от заданных вертикальных отметок.

Система может устанавливаться на асфальтоукладчики (рис. 13.11), планировщики, дренажники и другие строительно-дорожные и мелиоративные машины, а также машины, близкие по своему функциональному значению вышеназванным. Использование системы «Профиль-30» на машине сокращает количество рабочего времени на производство работ, позволяет экономить топливо, снижает психофизиологические нагрузки оператора, улучшает условия труда машиниста.

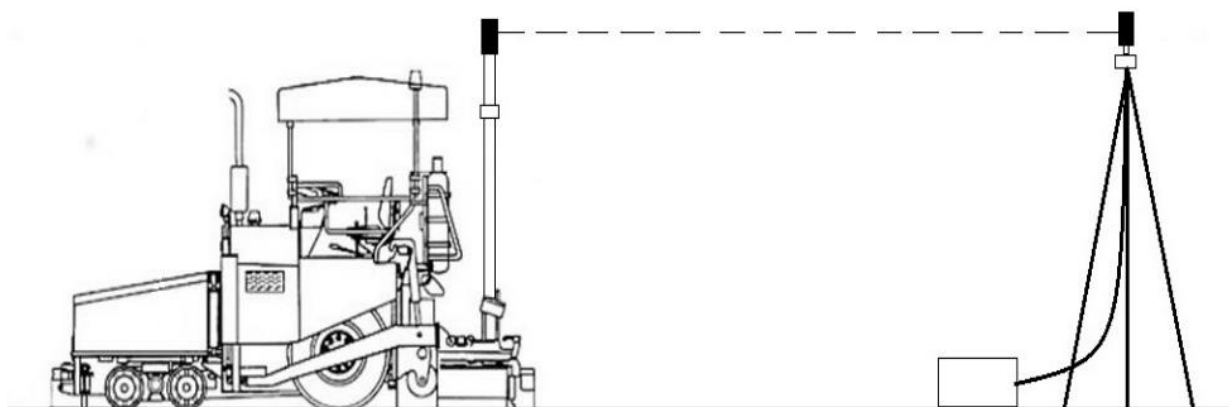


Рис. 13.11 – Асфальтоукладчик с системой «Профиль-30»

Техническая характеристика системы «Профиль-30»:

- диапазон плавной установки стабилизируемого клона в поперечной плоскости –  $\pm 8,8\%$ ...
- диапазон регулировки чувствительности (загрубления) по каналу стабилизации в поперечной плоскости – не более  $0,15\%$  и не менее  $1,50\%$ ;
- погрешность задания поперечного уклона задатчика-датчика –  $\pm 0,15\%$ ;
- шаг ступенчатой установки уклона –  $8^\circ$ ;
- диапазон ступенчатой установки стабилизируемого уклона –  $\pm 48^\circ$ ;
- диапазон дистанционного задания положения ФПУ по высоте – от 0 до 500 мм;
- электрическое питание:
  - а) род тока – постоянный;
  - б) напряжение – 12 и 24 В;
- диапазон задания по высоте с ценой деления 1 мм – от 0 до 80 мм;
- диапазон регулировки порога срабатывания по высоте – не более 1,6 мм.

Устройство системы. Система «Профиль-30» состоит из датчика углового положения ДКБ, двух датчиков продольного профиля ДЩБ, пульта управления, устройства перемещения ФПУ и двух гидрораспределителей с электрическим управлением (рис. 13.12).

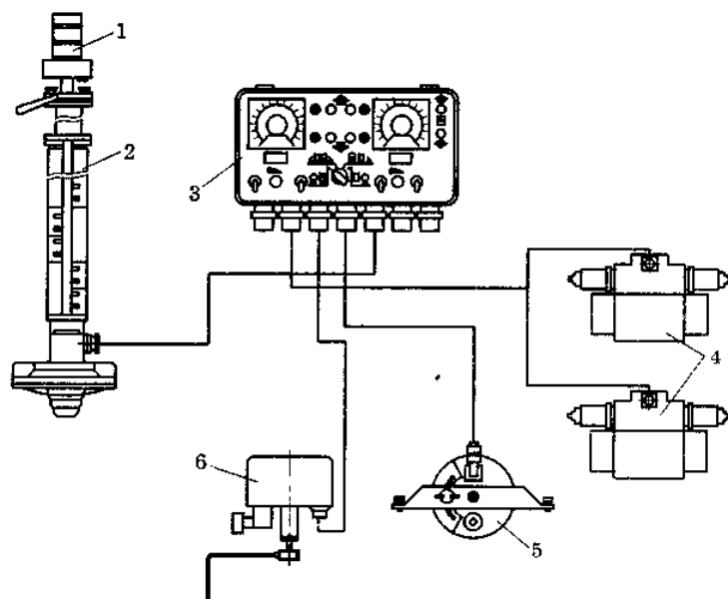


*Рис. 13.12 – Схема соединений блоков системы «Профиль-30»*

1 – фотоприемник; 2 – устройство перемещения; 3 – пульт управления; 4 – электрогидрозолотники; 5 – датчик ДКБ; 6 – датчик ДЩБ

Пульт управления (рис.13.13) служит для включения системы в работу, задания режима работы, контроля за работой приборов системы, формирования электрических команд управления исполнительными механизмами гидропривода системы.

На лицевой панели расположены тумблер 1 включения питания по каналам управления, переключатель режимов работы 2, ручки задатчиков углового и высотного положения рабочего положения машины 3, кнопки управления электромагнитами гидрораспределителей 4, кнопки управления устройством перемещения 5, ручки потенциометров «чувствительности» системы 6, переключатели «настройка – работа» 7, индикаторные лампы 8.

На нижней части пульта управления расположены штепсельные колодки разъемов для внешней коммутации. Внутри пульта расположены узлы: блоки сравнения с усилителями мощности и стабилизаторами напряжения, блоки подстроечных резисторов.

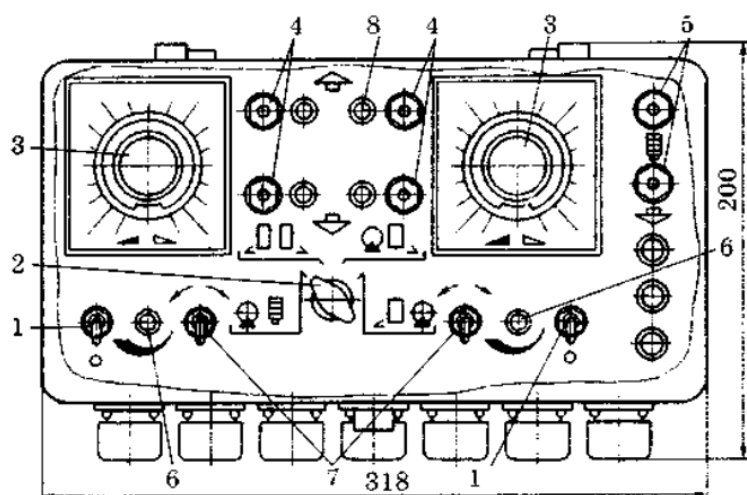


Рис. 13.13 – Пульт управления аппаратуры «Профиль-30»

Для автогрейдера функциональная схема системы «Профиль-30» показана на рис. 13.14.

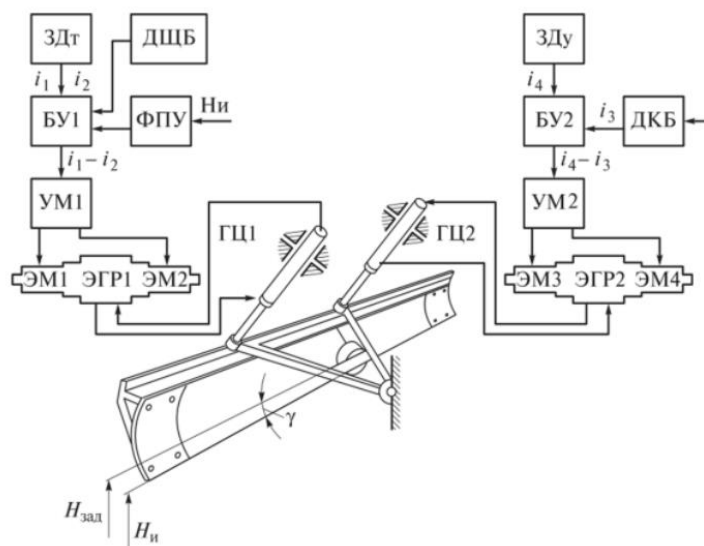


Рис. 13. 14. Функциональная схема системы «Профиль-30» для автогрейдера

Датчик углового положения ДКБ устанавливается на тяговой раме автогрейдера в районе передней шаровой опоры или на тыльной стороне отвала так, чтобы его ось совпала с осью поворота тяговой рамы относительно шаровой опоры.

Датчики продольного профиля ДЩБ устанавливаются на тыльной стороне отвала на стержне и фиксируются с помощью рукоятки, при этом щупы выступают за пределы отвала.

Устройство перемещения ФПУ устанавливается непосредственно на специальном подвижном кронштейне отвала автогрейдера, позволяющем ориентировать ФПУ вертикально. При этом шкала устройства перемещения находится в поле зрения оператора.

Пульт управления (ПУ) устанавливается на кронштейне в кабине водителя в удобном для него месте

### 13.5. Краны. Устройства автоматики.

С целью контроля за исправностью крана отслеживание состояния и допустимых нагрузок осуществляют датчики, сенсоры и ограничители. Они фиксируют состояние узлов крана, препятствуя возникновению предельных нагрузок. Виды приборов безопасности кранов – ограничители грузоподъемности представлены на рис. 13.11.



*Рис. 13.15. Ограничители грузоподъемности*

Основные приборы безопасности кранов делятся на:

- Регистраторы параметров работы оборудования, анемометры и датчики координации положения крана анализируют и сохраняют значения нагрузок, бокового ветра, положения относительно осей координат и линий электропередач.
- Блокировочные контакты препятствуют открытию двери кабины, крышки люка входа и т.д., для повышения безопасности оператора крана.
- Системы оповещения включают в себя звуковой сигнал и сообщения дисплея пульта кабины машиниста.
- Ограничители грузоподъемности. Препятствуют подъему груза, который превышает установленный в паспорте вес на 20-25%. Монтируются на устройства передвижения крана, крановые тележки, подъемные крюки, верхние и нижние подвески. Обязательны к установке при изготовлении крана.
- Ограничители движения в разные направления. Устанавливаются как на козловые, так и на мостовые краны. Такие системы контролируют и препятствуют превышению заданных параметров:
  - смещения и подъема крана или груза в крайние точки;
  - движения тележки вдоль направляющей оси;
  - вылета крана;

- рельсового пути.

К основным ограничителям движения в разные направления относятся:

- При воздействии сильного ветра и с целью защиты от угона крана на открытой площадке применяются противоугонные захваты с ручным или механическим приводом. Они устанавливаются в нижней части опор и удерживают кран в одном положении.
- Тупиковые упоры устанавливаются на концах крановых путей и подтележечных рельсов для ограничения допустимой дистанции передвижения крана или крановой тележки. Торможение до упоров происходит с расчетом тормозного пути при помощи специальных концевых выключателей двигателей.
- Концевые выключатели механизмов передвижения кранов монтируются на опоры, а концевые выключатели тележек по крайним точкам направляющих путей. Осуществляют торможение движения крана или тележки.
- Существуют также ограничители верхнего, нижнего и боковых положений. Ограничитель нижнего положения не допускает опущение груза ниже определенного установленного уровня, например ниже линии крановых рельс. Ограничители верхнего и боковых положений препятствуют движению в соответствующие крайние положения плоскостей.
- Ограничитель сматывания каната тали и других грузоподъемных систем останавливает вращение барабана намотки каната за 3 последних допустимых витка.
- Буферные устройства ставятся с целью замедления и поглощения ударной силы при движении крана на подходе к концевым точкам. Система торможения передвижения груза позволяет снизить скорость перемещения при приближении к установленному уровню.
- Устройства, предупреждающие сход крана с направляющих, рельс монтируются на подкрановых путях и обязательно устанавливаются на те краны, скорость передвижения которых превышает 30 метров в минуту.
- Опорные детали устанавливаются для сохранения устойчивости крана в случае поломки осей ходовых колес.

Приборы безопасности мостовых и козловых кранов. При сборке мостовых и козловых кранов в обязательном порядке предусматривается установка ограничителей грузоподъемности и движения в разные направления, также устанавливаются системы оповещения и блокировочные контакты. Козловые краны для гидроэлектростанций и мостовые перегружатели часто оборудуются противоугонными захватами с падающими (распорными) клиньями.

В процессе эксплуатации каждый из приборов безопасности крана необходимо проверять на исправность. При ежемесячных проверках и проведении ТО1:

проводятся испытания ограничителей нагрузки крана на правильность срабатывания при подъеме веса выше паспортного значения;

звуковой сигнал в кабине машиниста проверяется на громкость и четкость звучания. Ограничитель подъема крюка нагружается на предельный вес - при нормальном функционировании подъем должен останавливаться; тестируется ограничитель сматывания лебедки - должен срабатывать и приостанавливать намотку каната на барабан за 3 последних витка. При проведении ТО-2 для проверки исправности указателей угла наклона крана выполняется замер сдвига от центральной метки водного уровня при установке движения крана «вправо», «влево», «назад». Смещение метки не должно превышать 0.5%.

### **Системы автоматического управления кранов:**

1. **Система управления краном по радиоканалу** – система удаленного управления грузоподъемными устройствами.

Оператор в случае удаленного управления не должен присутствовать в крановой кабине, что существенно снижает временные затраты. Кроме того, технология позволяет осуществлять контроль за процессом подъема и транспортировки груза с разных точек и с максимальной эффективностью, обеспечивая безопасность процесса. Системы могут устанавливаться как на новые грузоподъемные механизмы, так и на действующую технику.

2. **Обозначение светом рабочей зоны крана**

Система этого типа может успешно использоваться для того, чтобы эффективно обозначать границы зоны, представляющей опасность, на полу рабочего помещения при помощи прожекторов со светодиодами. Это бюджетное, но крайне эффективное решение, позволяющее существенно повысить безопасность персонала в цехах, где интенсивно используются ГПМ.

3. **Система противораскачивания груза на базе датчика отклонения подвески от вертикали**

Наиболее распространённая проблема, с которой сталкиваются операторы грузоподъемных механизмов – это раскачивание грузов в процессе их транспортировки. На кранах релейно-контакторного типа проблема решается с использованием сверх динамического разгона или торможения противовключением. И тот, и другой метод не являются оптимальными, так как при частом использовании возрастает риск выхода из строя привода. В ГПМ, которые укомплектованы преобразователями частоты, работа привода в режимах контртока или сверх допустимой нагрузки исключено. Такое решение позволяет обеспечить долговечность техники, но серьезно затрудняет процесс торможения раскачивающегося груза. Разработаны технологии, которые препятствуют раскачке транспортируемого груза во время начала

подъема и на этапе торможения. Такое решение делает возможным торможение раскачки перемещаемого груза, даже в том случае, если причиной возникновения проблемы является столкновение транспортируемого груза с каким-либо препятствием.

Также эта система обеспечивает:

- своевременную остановку при зацепах;
- предотвращение перекосов при эксплуатации.

#### **4. Защита от столкновения**

На грузоподъемных кранах, в соответствии с нормами и правилами, в обязательном порядке должны присутствовать концевые выключатели, предназначенные для подачи сигнала остановки крана или его тележки, если механизм достигает крайнее положение. Так как расстояние эффективной работы датчиков этого типа небольшое, операторы ГПМ нередко допускают ошибки в установке скорости подхода к препятствиям, что вызывает аварии и столкновение с препятствиями. Это ведет к нарушению целостности оборудования и повреждений сооружений производственного цеха. Для того, чтобы решить эту проблему разработаны бесконтактные датчики, дальность срабатывания которых составляет свыше 15 м. Кран при этом может быть настроен таким образом, что при сближении с препятствием скорость в автоматическом режиме снижалась до безопасной. Эта технология позволяет исключить влияние человеческого фактора.

#### **5. Защита кранового моста от перекоса**

Одна из основных проблем, связанных с обслуживанием грузоподъемных кранов – износ ходовых колес механизмов. Несмотря на правильность установки и точность настройки геометрии крана не может гарантировать долговечность комплектующих при работе в цехах, где наблюдаются проблемы с путями. Новый подход к решению этой проблемы – установка дополнительной системы защиты от перекоса ГПМ. Она делает возможным оперативное отслеживание изменения расстояний между ребордой колес и головкой рельса.

#### **6. Установка видеонаблюдения**

Технология предназначена для эффективного выполнения следующих задач:

- Увеличения угла обзора оператора грузоподъемного крана при выполнении транспортировки грузов в условиях ограниченного пространства цеха.
- Обеспечение функции контроля за работой машиниста. В этом случае камера устанавливается непосредственно в кабине оператора.
- Непрерывная запись потокового видео на регистраторе, который монтируется в ГПМ.
- Трансляция видеоряда в локальную сеть и его архивирование на серверах компании.

- Повышение безопасности выполняемых работ в условиях пониженной видимости (благодаря камерам с инфракрасными датчиками).

## **7. Диспетчеризация ГПМ**

Эта технология используется для установки в компаниях, которые обладают обширным парком грузоподъемных механизмов, задействованных в постоянных производственных процессах. В таких производствах выход техники из строя нередко может привести к остановке всего рабочего процесса, что повлечет за собой серьезные материальные убытки. Диспетчеризация позволяет:

- Отслеживать номинальное состояние каждой единицы техники.
- Осуществлять обработку и архивирование сведений об эксплуатации НПМ.
- Вести статистический учет.
- Отслеживать особые случаи.
- Визуализировать работу ГПМ в формате графиков, схем, экранов и др.

Вся собранная информация может использоваться всеми заинтересованными лицами, что позволяет оптимальным способом спланировать работы по техническому обслуживанию, а также устранению проблем на начальных стадиях.

## **Вопросы к главе 13**

1. Иерархичность объектов управления (ОУ)
2. Эскалаторы. Устройства безопасности
3. Инжекторная система ДВС. Принцип работы
4. Автоматизированные системы управления автогрейдером
5. Система «Профиль-30»
6. Краны. Устройства автоматики.
7. Системы автоматического управления кранов
8. Диспетчеризация ГПМ

### Литература основная

1. Скрябин, В. А. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник / В. А. Скрябин, А. Г. Схиртладзе, А. Е. Зверовщиков. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2019. – 320 с.
2. Автоматика, автоматизация машин и робототехника. Методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 11 01 «Инновационная техника для строительного комплекса (по направлениям)» очной формы обучения Белорусско-Российский университет, 2024 – 48с.
3. Певзнер Л.Д. Теория систем управления: учебное пособие для вузов/Л.Д. Певзнер. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 448 с.- Текст: непосредственный ISBN 978-5-507-49635-8
4. Ефанов А.В. Теория автоматического управления: учебник для вузов/ А.В. Ефанов, В.А. Ярош. - 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 160 с.: ил. – Текст: непосредственный ISBN 978-5-507-47448-6
5. Захахатнов В.Г. Технические средства автоматизации: учебное пособие для СПО/ В.Г. Захахатнов, В.М. Попов, В.А. Афонькина. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 144 с.: ил. – Текст: непосредственный ISBN 978-5-507-46068-7
6. Методические указания и контрольная работа по дисциплине «Автоматика, автоматизация машин и робототехника». - Антоневи́ч А.И. Минск: БНТУ, 2010 – 32с.
7. Программирование программируемых логических контроллеров. Методическое пособие по дисциплине «Системы управления машинами». - Методическое пособие.- Антоневи́ч А.И. Минск: БНТУ, 2010 – 52с.
8. Программируемые реле EASY. Методическое пособие по курсу «Автоматика, автоматизация машин и робототехника». - Антоневи́ч А.И., Черепанов И.М. Минск: БНТУ, 2011. – ч.1.-33с.
9. Электронные программируемые реле серии EASY по дисциплине «Автоматика, автоматизация машин и робототехника»: Ч.2.: Программирование в среде EASY-Soft Pro. - Антоневи́ч А.И. Минск: БНТУ, 2015 – ч.2 - 29с.
10. Основы схемотехники. - Лабораторный практикум для направления специальности 1-36 11 01 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование (производство и эксплуатация)»: в 3 ч.- 47с.- Антоневи́ч А.И. Минск: БНТУ, 2020 – ч.1

### Литература дополнительная

11. Бабёр А.И. Основы автоматики: учеб. пособие / Бабёр А.И. ; . – Минск: РИПО, 2022. – 83 с.; ил. – Текст: электронный. – URL: <https://profbiblioteka.by/viewer/?bookinfo=81986>
12. Серебряков, А. С. Автоматика: учебник и практикум для вузов / А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов; под общей редакцией А. С. Серебрякова. — Москва: Издательство Юрайт, 2021. — 431 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-01103-8
13. Дерягин А.В. Основы автоматики и вычислительной техники: учебное пособие для СПО/ А.В. Дерягин, Ф.М. Сабирова. – Санкт – Петербург: Лань, 2024. = 108 с.: ил. – Текст: непосредственный.
14. Смирнов Ю. А. Основы автоматизации сельскохозяйственных машин: учебное пособие для вузов/ Ю.А. Смирнов. -Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 612 с.: ил. – Текст: непосредственный.