**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Р.К. Сафиуллин**

# ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Казань
2013

УДК 681.5 (075.8)
ББК 32.965
С21
**Сафиуллин Р.К.**
С21 Основы автоматики и автоматизация процессов: учеб. пособ. / Р.К. Сафиуллин. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2013. – 187 с.

ISBN 978-5-7829-0397-8

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В учебном пособии изложены основы автоматики и автоматизации процессов, связанных с производством стройматериалов, поточно-транспортных и подъемно-транспортных систем. Значительное внимание уделено измерительным преобразователям (датчикам) технологических параметров. Изложены основы теории автоматического регулирования. Рассмотрены современные технологии автоматизации на цементных, бетонных и кирпичных заводах.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям: «Строительство» 270800.62 (профили «ППСМИК», «ТГВ», «ВиВ»), «Информационные системы и технологии» 230400.62 (профиль «ИСиТ»), «Техносферная безопасность» 280700.62 (профиль «Инженерная защита окружающей среды»).

Илл. 146; табл. 12; библиогр. 21 наимен.

Рецензенты:
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматики и управления КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева
**Г.Л. Дегтярев**

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии, организации и механизации строительства КГАСУ
**В.С. Изотов**

УДК 681.5 (075.8)
ББК 32.965

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2013

ISBN 978-5-7829-0397-8

© Сафиуллин Р.К., 2013

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов строительных высших учебных заведений, изучающих основы автоматики и автоматизации процессов. Оно состоит из семи глав и Приложения. В первой главе кратко изложена история развития автоматики, вводятся основные понятия автоматики, классификация автоматических устройств. Вторая глава посвящена основам измерительной техники и приборам контроля технологических параметров. Здесь описаны измерительные преобразователи (датчики), рассмотрены мостовые и потенциометрические измерительные схемы.

Третья глава посвящена основам теории автоматического регулирования. Здесь описаны основные свойства систем автоматического регулирования (САР), объектов регулирования. На основе преобразований Лапласа рассмотрены динамические характеристики звеньев, типовые звенья, правила преобразований структурных схем САР и их элементов, вопросы устойчивости линейных (линеаризованных) САР, критерии устойчивости Гурвица и Михайлова. Представлены классификация автоматических регуляторов, их уравнения и конкретные схемы, описаны принципы их действия.

В четвертой главе рассмотрены релейно-контактные схемы, регулирующие органы и исполнительные механизмы. Приведены схемы и описаны принципы действия электромагнитных, магнитоэлектрических, электротепловых реле, контакторное управление трехфазными асинхронными двигателями.

В пятой главе рассмотрены некоторые вопросы автоматизации поточно-транспортных систем (конвейеров), подъемно-транспортных систем (лифтов, строительных кранов). В шестой главе рассмотрены вопросы автоматизации ямных и щелевых пропарочных камер при тепловлажностной обработке железобетонных изделий, автоматизация дозаторов, бетоносмесительного узла (БСУ), бетонного завода-автомата.

Седьмая глава посвящена современным технологиям автоматизации, внедренным на отечественных заводах стройматериалов в последние годы. Здесь рассмотрены: автоматический контроль уровня и массы цемента в силосах готовой продукции на цементных заводах, автоматизация пневмотранспорта цемента, АСУ ТП производства бетонных смесей, АСУ ТП бетонного завода, АСУ тепловлажностной обработки железобетонных изделий, АСУ процессом обжига керамических изделий на кирпичных заводах, АСУ автоклавной обработки силикатного кирпича.

В основу учебного пособия положен курс лекций, читаемых студентам строительно-технологического и строительного факультетов Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

# ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс во всех отраслях промышленности во многом определяется уровнем автоматизации производственных процессов. Автоматизация процессов повышает производительность труда, снижает численность обслуживающего персонала, улучшает условия труда, позволяет повысить качество продукции и снизить ее себестоимость, увеличивает производительность оборудования, уменьшает брак и отходы производства, снижает аварийность и повышает эффективность ведения технологических процессов.

Успехи в области автоматизации процессов в производстве стройматериалов в значительной мере зависят от грамотного проектирования, монтажа и эффективной эксплуатации внедряемых в производство систем комплексной автоматизации с использованием современных средств вычислительной техники (ЭВМ, контроллеров, микропроцессоров).

Эксплуатация систем комплексной автоматизации требует от инженеров-технологов и инженеров-механиков, работающих на современных предприятиях, определенного минимума знаний по основам измерительной техники, основам автоматики и автоматизации производственных процессов.

Данное учебное пособие ставит целью дать студентам сведения о наиболее распространенных измерительных преобразователях (датчиках) и методах измерения технологических параметров. В пособии излагаются также основы теории автоматического регулирования, приводятся современные схемы автоматизации технологических процессов на цементных, бетонных и кирпичных заводах. В Приложении приведены условные обозначения наиболее распространенных датчиков, приборов и средств автоматизации, которые широко применяются на функциональных схемах автоматизации технологических процессов.

Учебное пособие адресуется студентам всех форм обучения (дневной, заочной, дистанционной) по направлениям: «Строительство» 270800.62 (профили «производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций - ППСМиК», «теплогазоснабжение и вентиляция – ТГВ», «водоснабжение и водоотведение – ВиВ»), «Информационные системы и технологии» 230400.62 (профиль «Информационные системы и технологии»), «Техносферная безопасность» 280700.62 (профиль «Инженерная защита окружающей среды»).

# ГЛАВА 1. АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

## 1.1. Основные понятия и определения

Автомат (греч. *αυτοματος* - “аутоматос” – самодействующий) – это устройство, осуществляющее некоторый процесс без непосредственного участия человека. Появление первых автоматов относится к глубокой древности – это были часы и механические игрушки, которым придавали форму человека или животного. Известен автомат в виде летающего голубя (грек Архитас – современник Платона), автоматы в виде водяных часов, торговый автомат, движущиеся статуи (Герон Александрийский). В средние века были созданы андроиды – механические существа, копирующие человека. В этой области в XVIII веке особенно прославились Пьер и Анри Дро – швейцарские часовщики и французский механик Жак Вокансон. Известна жестяная утка Вокансона, состоявшая из тысяч деталей, которая могла летать, которую невозможно было отличить от живой утки (вплоть до процессов пищеварения). Свидетельства об этой утке содержатся в воспоминаниях Канта, Гегеля, Лейбница и других выдающихся мыслителей того времени. Со второй половины XVIII века начинается применение автоматов в промышленности. Это было связано с паровыми машинами. Первый промышленный регулятор для паровых машин был создан русским изобретателем И.И. Ползуновым. Его изобретение пролежало под сукном долгое время. По этой причине считается, что первый промышленный регулятор был создан Джеймсом Уаттом в 1784 г.

До недавнего времени автоматы строили, чтобы заменить человека при выполнении физически тяжелой и опасной работы. В 40-х годах XX века появились автоматы, выполняющие некоторые виды умственного труда - управляющие аналоговые и цифровые вычислительные машины – УВМ, АВМ, ЦВМ. Применение автоматов повысило производительность труда, точность и скорость выполнения производственных операций. Автоматы используются для освобождения человека от утомительного и однообразного труда, от вредных и опасных условий работы. Автоматы – основа технологического прогресса.

Под термином «Автоматика» понимают [1]:

1) область теоретических и прикладных знаний об автоматически действующих устройствах и системах. Термин «автоматика» подразумевает период исследований и практических разработок в области автоматического регулирования и управления до 40-х годов XX столетия. В 40-е годы XX века возникло новое научное направление – кибернетика. В рамках кибернетики появилась техническая кибернетика. Автоматика – это составная часть технической кибернетики;

2) совокупность механизмов и устройств, действующих автоматически.

В 1957 г. появился первый промышленный робот – фирмы Unimation (США). Название Unimation происходит от “Universal Automation” – универсальная автоматизация. Через 10 лет инициативу в области робототехники перехватила Япония, и с тех пор она является ведущей страной в этой области. Термин «робот» появился в 1920 г, придумал его чешский писатель Карел Чапек (происходит от чешского слова «робота» - работа). В настоящее время роботы все шире начинают применяться в различных областях промышленного производства: в машиностроении – при раскраске автомобилей, резке металла на автозаводских конвейерах; в строительном производстве – при роботизации и автоматизации земляных работ, при роботизации установки и монтажа строительных блоков и элементов, при автоматизации и роботизации бетонных работ, в роботизированных комплексах для отделочных работ, при автоматизации и роботизации работ в подземном строительстве, при роботизации строительных операций. Применяются роботы также и в военном деле.

XXI век – это эпоха расцвета автоматики, тотального проникновения автоматики в жизнь человеческого общества. Мы уже не мыслим себя без компьютеров, мобильных телефонов, контроллеров, микропроцессоров. Все это стало возможным в результате бурного, революционного развития электроники и микроэлектроники с начала 80-х годов XX столетия.

Устройства автоматики решают следующие важнейшие задачи: автоматического контроля технологических параметров, автоматического регулирования и автоматического управления процессами, технологической сигнализации, диспетчеризации, роботизации.

В настоящем курсе лекций наибольшее внимание обращено на автоматический контроль технологических параметров, теорию автоматического регулирования (ТАР), являющуюся теоретической основой автоматики, и на автоматизацию процессов в производстве стройматериалов.

## 1.2. Классификация автоматических устройств и систем

По назначению автоматические устройства подразделяются на следующие системы:

- системы автоматического контроля, предназначенные для получения информации о численных значениях выходных параметров объектов;
- системы автоматического регулирования, предназначенные для изменения выходных параметров объектов по заданному (или наперед неизвестному) закону во времени;
- системы автоматического управления, предназначенные для обеспечения любого требуемого режима работы объектов управления;

- системы защиты и блокировки – для защиты объектов управления от недопустимых состояний, которые могут привести к аварии, и их блокировки в отключенном состоянии до устранения причины аварийного состояния;
- системы автоматической сигнализации – для оповещения обслуживающего персонала о состоянии объектов управления;
- системы дистанционного управления – для управления объектами на расстоянии, при котором число линий связи равно числу каналов управления;
- системы телеуправления – для управления объектами на расстоянии, при котором используется минимальное количество линий связи.

По роду потребляемой энергии системы автоматики подразделяются на электрические (электронные), гидравлические, пневматические, комбинированные. Электрические (электронные) системы получили наибольшее распространение, так как электрические сигналы наиболее удобны для создания автоматических, телемеханических и вычислительных устройств.

## 1.3. Понятие об автоматическом контроле. Измерительные преобразователи, датчики, их основные характеристики

Автоматический контроль технологических параметров тесно связан с их измерением. Задачу измерения выполняет измерительная цепь. Она состоит из совокупности измерительных преобразователей - устройств, в которых реализуется взаимно-однозначная зависимость между входной и выходной величинами. Первичный измерительный преобразователь называется датчиком.

В общем виде датчик может быть представлен в виде чувствительного элемента (ЧЭ) и преобразователя (Пр): $X \to ЧЭ \to X_1 \to Пр \to Y$. Чувствительный элемент (ЧЭ) в системах автоматики выполняет функции органов чувств. Он предназначен для преобразования контролируемой величины $X$ в такой вид сигнала $X_1$, который удобен для измерения. В преобразователе происходит преобразование сигнала $X_1$ в сигнал $Y$, чаще всего в электрический сигнал. Например, давление $X$ в электроконтактном манометре преобразуется при помощи ЧЭ в перемещение стрелки $X_1$, а затем в преобразователе – в изменение сопротивления $Y$.

К основным характеристикам датчиков относятся следующие:
1) статическая характеристика;
2) инерционность;
3) динамическая (дифференциальная) чувствительность;
4) порог чувствительности;
5) погрешности.

Статическая характеристика – это алгебраическая зависимость выходной величины от входной: $Y = Y(X)$.

Инерционность – характеризует отставание изменений выходной величины от изменений входной величины. Чем меньше инерционность, тем лучше. Например, инерционность металлических термометров сопротивления (ТС) составляет десятки секунд и минуты, а инерционность полупроводниковых ТС – десятые доли секунды.

Динамическая чувствительность определяется как $S = \frac{dY}{dX}$. Желательно иметь большую динамическую чувствительность.

Порог чувствительности – это наименьшее по модулю значение входного сигнала, которое вызывает изменение выходного сигнала.

Погрешности бывают: абсолютная, относительная и приведенная. Приведенная погрешность определяется формулой:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100\,\%. \qquad (1.3.1)$$

Класс точности прибора определяется его максимальной приведенной погрешностью. Чем меньше эта величина, тем точнее прибор. В промышленности используются приборы, класс точности которых находится в пределах $0{,}05 \le \gamma \le 4$.

Наибольшее распространение в автоматике получили электрические датчики, которые можно подразделить на две большие группы: параметрические и генераторные. Параметрические датчики преобразуют неэлектрические входные сигналы в изменение параметров *R,L,C,M* (активного сопротивления, индуктивности, емкости, взаимной индуктивности) выходной цепи. Параметрические датчики подразделяются на датчики активного сопротивления (контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, терморезисторы) и датчики реактивного сопротивления (индуктивные, взаимно-индуктивные, магнитоупругие, емкостные).

Генераторные датчики преобразуют входную величину в ЭДС или ток. К ним относятся термоэлектрические (термопары), пьезоэлектрические, тахометрические, некоторые фотоэлектрические датчики и др.

# ГЛАВА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

## 2.1. Преобразователи активного сопротивления

Контактные датчики. В них механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрическими цепями. При замыкании контактов активное сопротивление между ними изменяется от ∞ до небольшого значения. Контакты являются

самой важной частью этих датчиков. Чем меньше мощность, разрываемая этими контактами, тем меньше обгорает контакт. Эти датчики широко применяются при автоматическом контроле и сортировке по линейным размерам изделий с точностью до 1 мм [2-4].

Реостатные и потенциометрические датчики служат для преобразования углового или линейного перемещения в электрический сигнал [2-4]. Конструктивно они состоят из изоляционного каркаса, намотанной на него плотно тонкой проволоки и ползунка. Каркас изготовляют из текстолита, пластмассы или алюминиевых сплавов, покрытых изоляционным лаком или оксидной пленкой. Проволока должна иметь большое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент и диаметр порядка сотых долей мм. Используют проволоку из константана, манганина, нихрома.

На рис. 1 представлен реостатный датчик, приводимый в движение осью манометра или другого первичного измерителя. Реостатные датчики могут соединяться с прибором, имеющим сравнительно большой вращающий момент (манометры, поплавковые уровнемеры и т. п.). Как видно из рис. 1, датчик состоит из проволоки (обычно манганиновой или константановой), намотанной на текстолитовое или пластмассовое основание 1. Подвижный контакт 2 приводится в действие от первичного измерителя 4. Электрическое соединение подвижного контакта с сетью производится через спиральную пружинку 3.

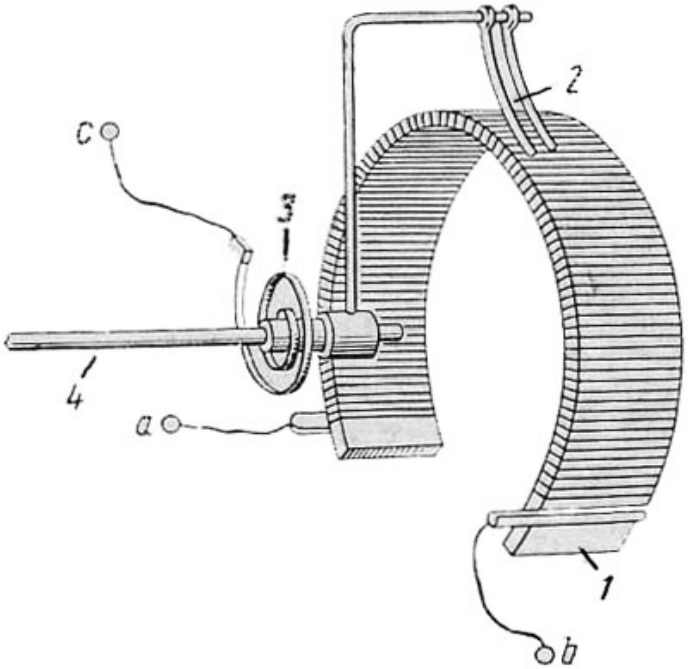



**Рис. 2.1. Реостатный датчик**

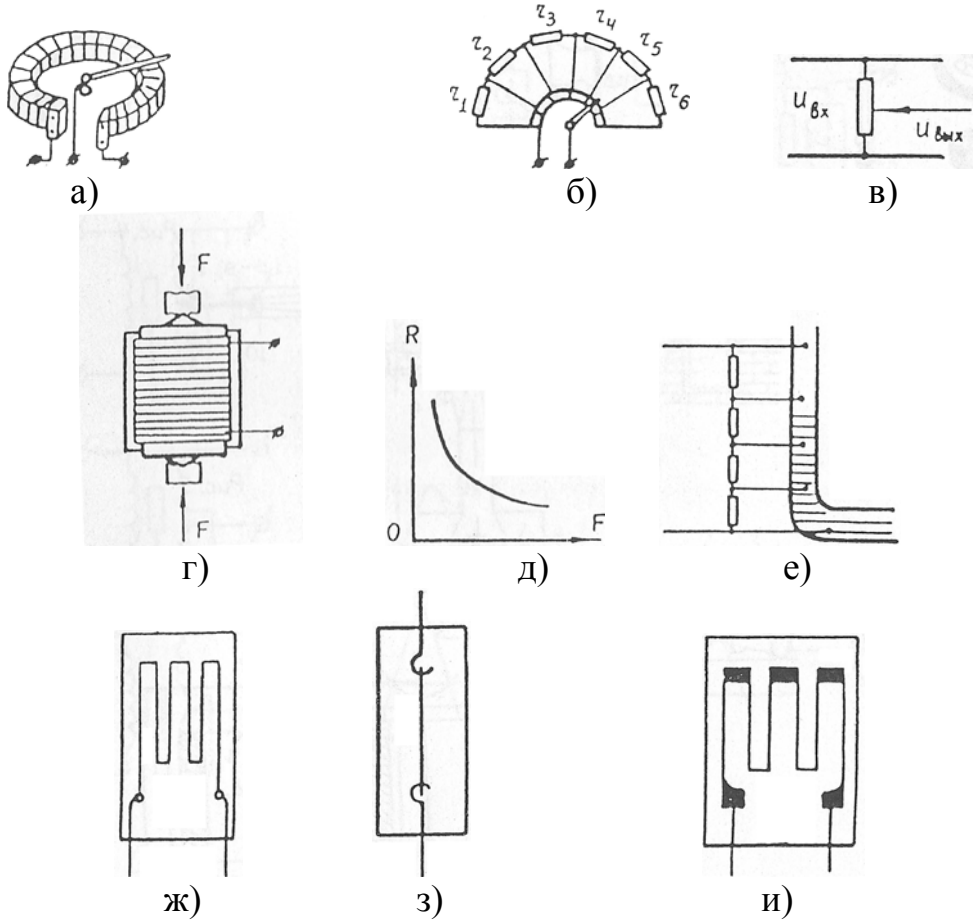



**Рис. 2.2. Омические преобразователи: а – с бесступенчатой многооборотной намоткой; б – с секционированной намоткой; г – угольный датчик усилия; д – характеристика последнего; е – датчик уровня электропроводных жидкостей; ж,з – проволочные тензопробразователи; и – фольговый тензопреобразователь**

Датчики на рис. 2.2а, 2.2б измеряют угловые перемещения, на рис. 2.2в – линейные перемещения. На рис. 2.2г представлен датчик силы. Он представляет собой набор графитовых дисков, собранных в столбик, к которым через контактные диски и упоры приложены силы. Под воздействием приложенной силы диски плотнее прижимаются друг к другу. Сопротивление датчика уменьшается. На рис. 2.2д представлена характеристика действия этого датчика. На рис 2.2е представлен датчик уровня электропроводной жидкости. Он представляет собой набор активных сопротивлений. Контакты от них размещаются внутри трубки с жидкостью. Чем больше сопротивлений включится параллельно столбу жидкости, тем меньше сопротивление датчика.

Тензодатчики (рис. 2.2ж) предназначены для измерения статических или динамических деформаций в деталях оборудования, станках, мостах и т.д. В основу работы положено свойство металла изменять свое электрическое сопротивление под действием приложенных сил. Широко применя-

ются проволочные, фольговые, полупроводниковые тензодатчики. Рассмотрим принцип действия металлического тензодатчика. Внутри слюдяной пластинки заделывается тонкая проволока диаметром от 0,02 до 0,05 мм. Слюдяная пластинка специальным клеем плотно наклеивается на испытуемый объект. Основными характеристиками датчика являются номинальное сопротивление ($R$= 50 $\div$400 Ом), длина базы $l_б$ (15$\div$45 мм), коэффициент тензочувствительности $K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$. Для большинства металлических тензодатчиков $K$ = 1,8 ÷ 2,5. Важной характеристикой также является номинальный ток $I_{ном}$ (~ 30 мА). К достоинствам проволочных тензодатчиков относятся: линейность характеристики, низкая стоимость. В фольговых датчиках используется решетка из тонких полосок металлической фольги толщиной в несколько мкм. В полупроводниковых тензодатчиках используются германий, кремний, арсенид галлия. У таких датчиков $K$ ~ 200, $l_б$ ~ 3 $\div$10 мм, $R_{ном}$ ~ 1000 Ом . К достоинствам таких датчиков относится большой коэффициент тензочувствительности. К недостаткам относятся: малые гибкость, механическая прочность, разброс характеристик, нелинейность.

## 2.2. Измерительные преобразователи температуры

Температура – важнейший технологический параметр. Около 40% измерений в промышленности приходится на измерение температуры. Температура – это мера внутренней энергии тела, т.е. мера хаотического движения атомов и молекул. Согласно молекулярно-кинетической теории (МКТ) средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул вещества связана с абсолютной температурой соотношением:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \qquad (2.2.1)$$

где $k$ – постоянная Больцмана. Температуру непосредственно измерить невозможно. Ее измеряют путем измерения других физических величин, функционально с ней связанных. Эти функциональные зависимости были установлены в ходе развития естественно-научных дисциплин Термодинамическая температура связана с температурой Цельсия соотношением $T(K) = t$ (°C) +273,15. Измерительные преобразователи температуры можно подразделить на несколько больших групп [4,5,10,11]:

- термометры расширения;
- термометры сопротивления;
-манометрические термометры;
- термоэлектрические термометры (термопары);
- пироэлектрические термометры (греч. *пиро* – огонь).

Термометры расширения бывают жидкостные, биметаллические и дилатометрические. В жидкостных термометрах в качестве рабочих жидкостей используют: ртуть (-35º С $\div$ +750 ºС), толуол (-90ºС $\div$ +200ºС), этиловый спирт (-80ºС $\div$ +70ºС), керосин (-60ºС $\div$+300ºС), пентан (-200ºС +20ºС) и др. Чувствительным элементом биметаллических термометров является двухслойная пластинка или двухслойная спираль (рис. 2.3). Слои отличаются температурными коэффициентами расширения. При увеличении температуры чувствительный элемент изгибается в сторону слоя с меньшим температурным коэффициентом. В дилатометрических термометрах чувствительным элементом являются два металлических стержня с различными температурными коэффициентами. При достижении определенной температуры чувствительный элемент замыкает или размыкает какой-либо электрический контакт. Биметаллические и дилатометрические термометры применяются обычно при автоматической защите двигателей и других объектов от перегрева.

Термометры сопротивления (ТС) бывают металлические и полупроводниковые. Чувствительным элементом металлического ТС является металлическая проволока, бифилярно намотанная на изоляционный каркас. При нагревании электрическое сопротивление проволоки увеличивается. Бифилярная намотка – это намотка вдвое сложенным проводом. При такой намотке магнитные поля, создаваемые токами соседних витков, практически полностью компенсируют друг друга. Такую намотку называют также безиндуктивной. На практике чаще всего применяют медную и платиновую проволоки. Для медной проволоки имеет место температурная зависимость: $R_t = R_0(1+\alpha t)$, где $R_0$ - сопротивление проволоки при 0ºС, $\alpha = 4{,}26 \cdot 10^{-3} (град^{-1})$. При нагреве на 100ºС сопротивление медной проволоки увеличивается на 42,6%. Медные ТС используются в диапазоне $-50 \div 200$ºС. Для платинового ТС справедлива зависимость: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$. Здесь $A$=3,968·10$^{-3}$ (град$^{-1}$), $B$ = -5,85·10$^{-7}$ (град-$^{2}$). Обычный температурный диапазон для платиновых ТС составляет: $-200 \div +650$ºС, расширенный диапазон: $-260 \div +1100$ºС. Используют также никелевые ТС, для них $\alpha \approx 6{,}4 \cdot 10^{-3} (град^{-1})$. При $t \geq$ 600ºС используются вольфрамовые ТС. Кроме проволочных ТС выпускаются также тонкопленочные из тонких слоев платины или ее сплавов, нанесенных на кремниевую микромембрану. В диапазоне $0 \div 200$ºС применяются кремниевые ТС. Они встраиваются в микроструктуру для осуществления температурной компенсации и используются также в системах, обеспечивающих безопасность нагревательных устройств.

Термометры сопротивления работают в комплекте с электронными мостами и логометрами (рис. 2.5).

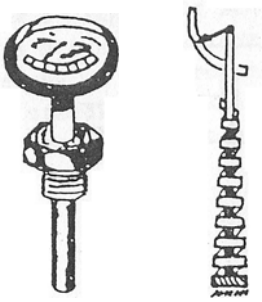


**Рис. 2.3.**
**Термометр биметаллический**

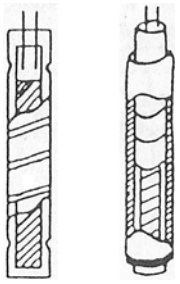


**Рис. 2.4.**
**Термометр сопротивления металлический**

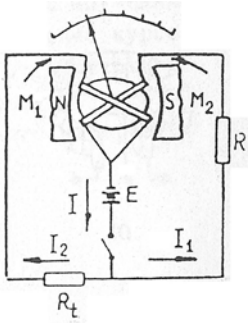



**Рис. 2.5. Схема логометра**

Термисторы – это полупроводниковые ТС. Список термисторов широк. Чувствительный элемент термистора изготовляется из смеси окислов различных металлов (окиси железа, никеля, кобальта, марганца). Смесь окислов тщательно перемешивается, подвергается спеканию, из этого материала изготовляют чувствительный элемент термистора. При нагреве на 100º С сопротивление термисторов уменьшается в несколько раз. Температурная зависимость термисторов представляется в виде: $R_t = A \cdot e^{B/T}$. Здесь $A$ и $B$ – константы для данного вида термистора, $T$ – температура в градусах Кельвина. Температурный диапазон, охватываемый термисторами, составляет $-100 \div 300$ºС. Более универсальная зависимость имеет вид:

$$\ln R_T = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}. \qquad (2.2.2)$$

Позисторы напоминают термисторы, но температурный коэффициент у них положительный. Основой позисторов является титанат бария – $BaTiO_3$.

К достоинствам металлических ТС относятся: высокая точность изготовления, хорошая взаимозаменяемость; недостатками являются: большие размеры и значительная инерционность (превышающая 10 с). Достоинствами полупроводниковых ТС являются: малые размеры, высокое быстродействие (порядка 0,1 с); к недостаткам относятся: меньший температурный диапазон (-100 ÷ 300 °С) и разброс характеристик (более 1%).

Действие манометрических термометров (МТ) основано на изменении давления термометрического вещества в замкнутом объеме при изменении температуры. Конструктивно они представляют из себя термобаллон, полую пружину и капиллярную трубку, соединяющую термобаллон с пружиной. Существуют три типа таких термометров: жидкостные, газовые и паровые (конденсационные). Температурный диапазон МТ: -200 ÷ 600 °С.

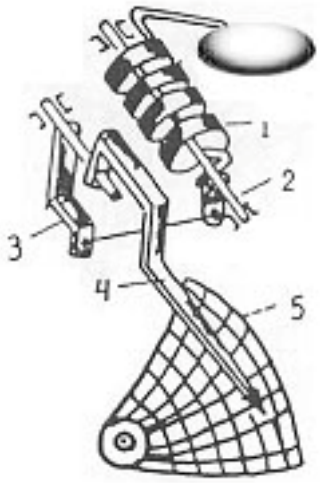



**Рис. 2.6. Манометрический термометр**

На рис. 2.6 представлен типичный манометрический термометр (МТ). В жидкостных МТ вся система заполняется ртутью или органическими жидкостями. Температурный диапазон: $-200 \div 300$ ºС. В газовых МТ система заполняется азотом $N_2$. температурный диапазон у них: $-50 \div 600$ºС. В конденсационных МТ 2/3 баллона заполняются жидкостью с низкой температурой кипения, давление создают пары этой жидкости. Применяются: фреон-22 (диапазон $-85 \div +80$ºС), пропилен $C_3H_6$ ($-50 \div +60$ºС), хлористый метил $CH_3Cl$ ($0 \div 125$ºС), ацетон $C_3H_6O$ ($100 \div 200$ºС), этилбензол ($-160 \div 300$ºС). Шкалы у жидкостных и газовых МТ равномерные, а у конденсационных МТ – сильно неравномерные.

Действие термоэлектрических термометров (термопар) основано на явлении, открытом в 1827 г. Зеебеком. Начали применяться они в конце XIX века. В основе эффекта лежит контактная разность потенциалов, которая возникает при электрическом контакте двух разнородных проводников. Если температуры рабочего спая и свободных концов различаются, то между металлами создается ЭДС.

Контактная разность потенциалов была открыта еще раньше Алессандро Вольта в 1795 г. На практике чаще других применяются следующие термопары: 1) хромель-копель, диапазон измерений ($-200 \div 600$ºС); 2) хромель-алюмель ($-200 \div 1000$ºС); 3) платинородий - платина ($0 \div 1300$ºС); 4) платинородий (30% родия Rh) – платинородий (6% родия) ($300 \div 1600$ºС); 5) вольфрам-рений (5% Re) –вольфрам-рений (20% Re) ($0 \div 2200$ºС).

Термопары используются в комплекте с милливольтметрами и автоматическими потенциометрами.

Действие пирометров основано на тепловом излучении тел. Согласно современной физике, все тела испускают тепловое излучение – электромагнитные волны. Чем выше температура тела, тем сильнее оно излучает. Согласно закону Стефана-Больцмана, единица площади абсолютно черного тела излучает $\sigma T^4$ тепловой энергии в единицу времени, где $\sigma$ - постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м$^2 \cdot K^4 \cdot$с) Реальные тела излучают меньше, в связи с чем для них вводят коэффициент «серости» $\kappa < 1$.

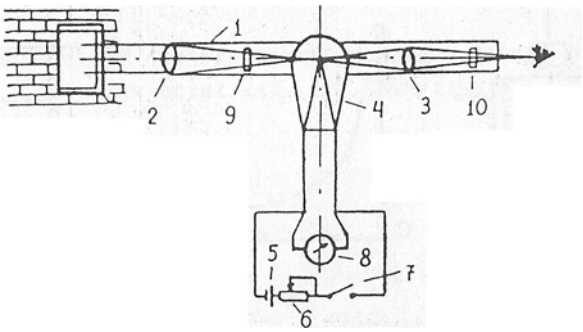



**Рис. 2.7. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью (1– телескоп, 2 – линза объектива; 3 – окулярная линза; 4 – лампа накаливания; 5 – аккумулятор; 6 – реостат; 7 – выключатель; 8 – милливольтметр; 9 – фильтр; 10 – красный светофильтр)**

Применяются пирометры полного и частичного излучения. На рис. 2.7 изображена схема пирометра частичного (видимого) излучения. Излучение тела фокусируется оптической системой прибора на фокальную плоскость, где производится сравнение яркости источника излучения и яркости нити накала. Яркость нити накала можно регулировать с помощью реостата. Наблюдение ведется визуально через красный светофильтр. Если яркости одинаковые, то глаз видит однородную картину. Если яркость нити накала меньше, то она изображается в виде темной полоски. С помощью реостата добиваются однородной картины. Каждому положению движка реостата соответствует определенная температура.

На рис. 2.8 представлена схема пирометра полного излучения. Излучение от источника фокусируется на рабочем спае термопары. Рабочий спай нагревается. Через рамку начинает протекать ток. Рамка поворачивается в магнитном поле, чему противодействует пружина. Чем выше температура тела, тем интенсивнее излучение, тем сильнее нагрев термопары, тем больше ЭДС, ток в рамке и угол поворота указательной стрелки.

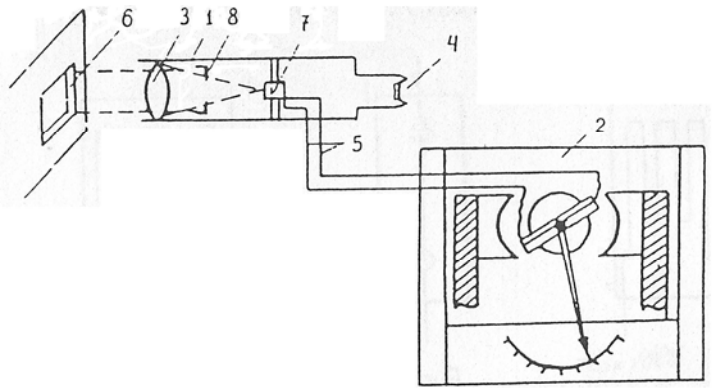



**Рис. 2.8. Схема радиационного пирометра (1 – телескоп; 2 – вторичный прибор; 3 – линза; 4 – окуляр; 5 – соединительные провода; 6 – объект измерения; 7 – термочувствительный элемент; 8 – диафрагма)**

## 2.3. Электромагнитные измерительные преобразователи

Электромагнитные преобразователи можно подразделить на 4 группы: 1) индуктивные; 2) взаимно-индуктивные (трансформаторные); 3) индукционные; 4) магнитоупругие [7].

В индуктивных преобразователях (рис. 2.9)входной величиной является перемещение, под влиянием которого изменяется индуктивность датчика. Преобразователь содержит стальной магнитопровод, подвижный якорь, обмотку с числом витков $W$, которая подключена к источнику переменного напряжения. Индуктивность датчика определяется формулой

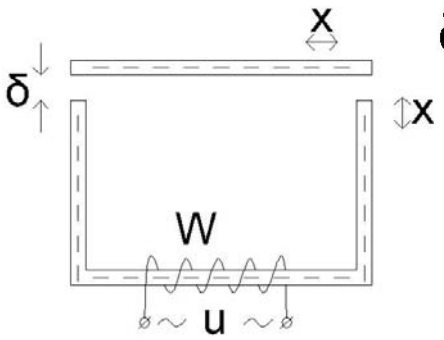
$L = \dfrac{W^2}{R_M}$, где $R_M$ – магнитное сопротивление, $\delta$ - воздушный зазор,

$R_M = R_{M,ст} + R_{M,в}$, $R_{M,ст} = \dfrac{l_{ст}}{\mu_0 \mu_{ст} S_{ст}}$, $R_{M,в} = \dfrac{2\delta}{\mu_0 S}$ ; $\mu_{ст}, \mu_в$ – относительная магнитная проницаемость стали и воздуха, соответственно. Поскольку магнитная проницаемость стали в сотни раз больше магнитной проницаемости воздуха, то магнитным сопротивлением стали можно пренебречь и $L \approx \dfrac{W^2}{R_{M,в}} = \dfrac{W^2}{\dfrac{2\delta}{\mu_0 S}} = \dfrac{\mu_0 W^2 S}{2\delta}$ . Ток в обмотке датчика

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{2U\delta}{\mu_0 W^2 S} \qquad (2.3.1)$$

пропорционален величине зазора. В приведенных формулах $l_{ст}$ – длина стальной части при полном обходе магнитопровода.

Индуктивные датчики используются для измерения небольших перемещений.



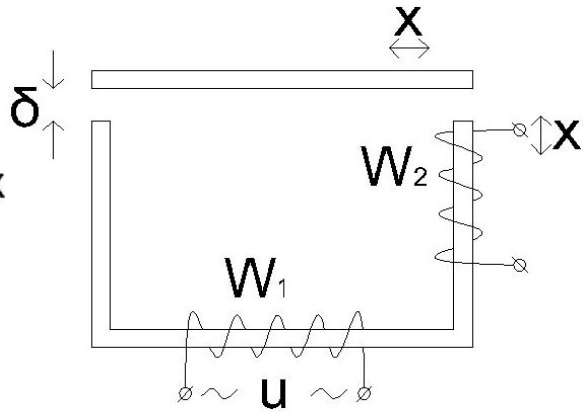
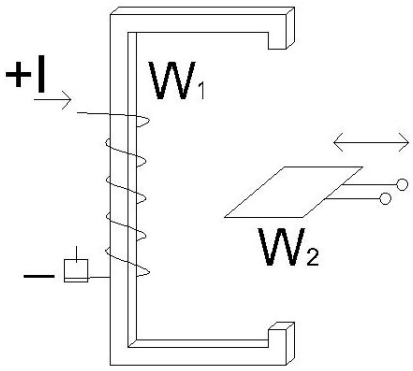




**Рис. 2.9. Индуктивный датчик** **Рис. 2.10. Взаимно-индуктивный датчик**

Трансформаторные (взаимно-индуктивные) преобразователи содержат две обмотки (рис.2.10). Под действием входной величины (перемещения) изменяется взаимная индуктивность $M$ двух катушек. Взаимная индуктивность $M$ характеризует влияние одной катушки на другую. Она входит в уравнения, описывающие токи в обеих катушках.

Индукционные преобразователи служат для измерения скорости линейного или углового перемещения (рис.2.11). Ток, протекающий по обмотке с числом витков $W_1$, намотанной на сердечник, создает магнитное поле. При перемещении обмотки с числом витков $W_2$ в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости линейного или углового перемещения подвижной рамки.



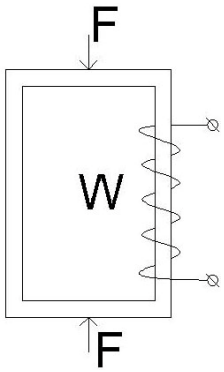




**Рис. 2.11. Индукционный датчик** **Рис. 2.12. Магнитоупругий датчик**

В магнитоупругих преобразователях (рис.2.12) под влиянием приложенной силы изменяется магнитная проницаемость стали. Воздушный зазор отсутствует. Механическое воздействие на преобразователь вызывает деформацию сердечника, которая влияет на его магнитную проницаемость. Эти датчики применяют для измерения сил и деформаций.

## 2.4. Пьезоэлектрические и емкостные преобразователи

Пьезодатчики используются при исследовании вибраций и быстрых динамических процессов [4,7].

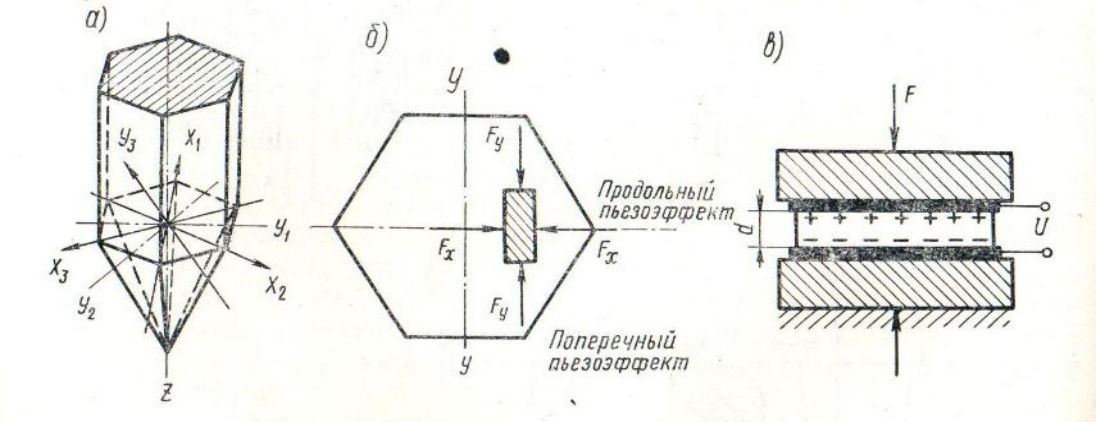



**Рис. 2.13. Пьезоэлектрический преобразователь: а – схема кристалла; б – расположение среза; в – схема конструктивного исполнения преобразователя**

Их действие основано на том, что сила, приложенная к твердому диэлектрику, вызывает деформацию кристаллической решетки. В некоторых кристаллах при этом (кварц, сегнетова соль, титанат бария – $BaTiO_3$) происходит смещение зарядов внутри кристаллической решетки. На противоположных гранях кристаллов появляются заряды противоположной полярности. Это «прямой пьезоэффект». В качестве примера рассмотрим кристалл кварца. Кристалл (рис. 13а) имеет три лежащие в одной плоскости электрические оси $X_1$, $X_2$, $X_3$, проходящие через ребра. В той же плоскости перпендикулярно электрическим осям имеются нейтральные (механические оси $Y_1$, $Y_2$, $Y_3$. оптическая ось $Z$ ( продольная ось кристалла) перпендикулярна к электрическим и нейтральным осям. Срез в виде параллелепипеда должен иметь грани, параллельные осям кристалла. Наименование срезу дают по оси, перпендикулярной наибольшей поверхности (например. ($X$-срез, $Y$-срез).

При действии сил $F_x$ или $F_y$ на гранях, перпендикулярных к электрической оси кристалла появляется электрический заряд.

Продольный пьезоэффект: $q = kF_x$, поперечный пьезоэффект: $q = -k\dfrac{S_x}{S_y}F_y$,

где $k$ – пьезомодуль, $S_x$, $S_y$ – площадь граней, перпендикулярных, соответственно, осям $X$ и $Y$. При действии сил вдоль оптической оси пьезоэффект не наблюдается.

Наблюдается также обратный пьезоэффект, когда к пластине пьезодатчика прикладывают переменное напряжение, и она начинает колебаться с частотой переменного тока. Пьезодатчики чаще всего применяют на частотах свыше 15 кГц.

В последние годы широко используются керамические пьезодатчики из титаната цирконата свинца (PZT), а также пьезокристаллические пленки PVDF [5]. PVDF – это полукристаллический полимер. Его химическая формула состоит из повторяющихся звеньев $CF_2$-$CH_2$ ( около 2 тыс. звеньев). Пленка является практически прозрачной в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах, является механически прочным и гибким материалом.

Пьезоэлектрические пленки обладают следующими уникальными свойствами: 1) широким частотным диапазоном: 0,001 … $10^9$ Гц; 2) большим динамическим диапазоном: от мкТорр до Мбар; 3) низким акустическим импедансом: близким к воде, человеческим тканям и клеевым составам; 4) высокой упругой податливостью; 5) высоким выходным напряжением: на порядок выше, чем у пьезокерамики при одинаковых приложенных силах; 6) высокой электрической прочностью диэлектрика – до 75 В/мкм; 7) высокой механической прочностью и ударостойкостью; 8) высокой стабильностью: устойчивостью к влажности, большинству химических реактивов, окислителям, мощному УФ и ядерному излучениям; 9) из них можно получить структуры произвольной формы; их можно соединять обычными клеями.

Действие емкостных преобразователей основано на преобразовании входной величины в изменение емкости конденсатора. Например, для плоского конденсатора емкость $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ зависит от расстояния между пластинами $d$, площади перекрытия пластин $S$ и относительной диэлектрической проницаемости среды между обкладками конденсатора $\varepsilon$. С помощью емкостных преобразователей контролируют линейные и угловые перемещения, степень заполнения баков сыпучим или жидким материалом, влажность, химический состав и толщину непроводящих материалов. Для промышленных емкостных датчиков характерным значением емкости являются десятки пикофарад (пФ). Емкостные датчики обычно используют на частотах, превышающих десятки кГц.

## 2.5. Измерительные преобразователи влажности

При контроле влажности воздуха и газовых смесей применяют психрометрический, гигроскопический, электролитический методы, а также метод точки росы [4,7].

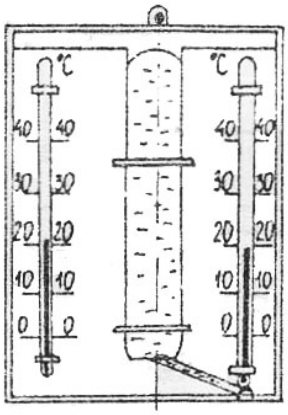



**Рис. 2.14. Психрометр Августа**

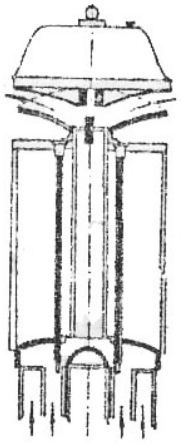


**Рис. 2.15. Психрометр Ассмана**

Психрометрический метод является наиболее простым и надежным. Он основан на зависимости испарения воды от влажности воздуха. Психрометр Августа состоит из двух одинаковых термометров, закрепленных на общем основании (рис. 2.14). Чувствительный элемент одного из термометров обернут тканью (фитилем), свободный конец которой опущен в стеклянный резервуар, заполненный водой. По капиллярам ткани вода поднимается вверх, и баллон этого термометра смачивается водой (мокрый термометр). Второй термометр называется сухим. За счет испарения воды с поверхности фитиля рабочая жидкость в баллоне мокрого термометра охлаждается. Поэтому показания мокрого термометра ниже, чем показания сухого. Разность показаний сухого и мокрого термометров называют психрометрической разностью. Чем суше воздух, тем больше эта разность. Относительная влажность воздуха находится по показаниям сухого и мокрого термометров с помощью психрометрической таблицы. Основным недостатком этого психрометра является то, что чувствительные элементы термометров не защищены от лучистого теплообмена.

Более совершенным является аспирационный психрометр Ассмана (рис. 2.15). Здесь оба термометра заключены в металлические трубки, через которые с помощью вентилятора прокачивается воздух со скоростью 2,5-3 м/с.

Гигроскопический метод контроля влажности основан на том, что некоторые материалы, (например, обезжиренный человеческий волос, различные полимерные материалы) с изменением влажности воздуха изменя-

ют свои линейные размеры. Это используется в гигрометрах и в гигрографах. Гигрографы – это самопишущие приборы для контроля относительной влажности. Они применяются в санитарной технике и метеорологии. Чувствительный элемент гигрографа представляет собой пучок обезжиренных человеческих волос, капроновую нить или круглую мембрану, изготовленную из специально обработанной гигроскопической пленки. Изменение относительной влажности воздуха вызывает изменение длины пучка волос или прогиба мембраны, которые преобразуются передаточным механизмом в перемещение стрелки с пером по диаграммной ленте, приводимой в движение двигателем или часовым механизмом.

Промышленные электронные психрометры используют для измерения и регулирования относительной влажности воздуха и газов. В качестве чувствительных элементов применяются "сухой" и "мокрый" термометры сопротивления $R_c$ и $R_м$, включенные в смежные плечи мостовой измерительной схемы автоматического электронного моста типа КСМ3 или КСМ4 (рис. 2.16). Проходящий через датчики анализируемый воздух или газ обтекает термометры с одинаковой скоростью. При изменении относительной влажности воздуха изменяется $R_м$, условие равновесия мостовой схемы нарушается и в измерительной диагонали моста появляется разность потенциалов, пропорциональная относительной влажности.

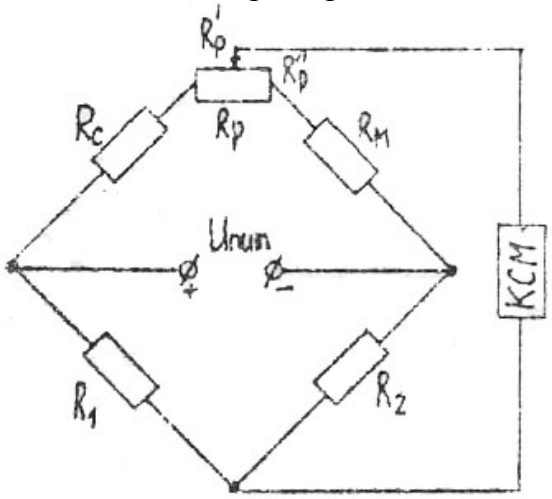



**Рис. 2.16. Промышленный электронный психрометр**

Метод точки росы. Принцип действия основан на зависимости температуры, при которой из окружающего воздуха или газа выпадает влага в виде капелек росы, от относительной влажности. Упрощенная схема, реализующая этот метод, приведена на рис. 2.17.

Через цилиндр 1 с зеркально отполированной внешней поверхностью пропускается хладоноситель, который охлаждает его стенки. Пока не достигнута температура точки росы, лучи от источника света *HL* отражаются зеркальной поверхностью цилиндра и попадают на фотопреобразователь *BL*. Его сопротивление резко уменьшается и через обмотку реле К1 проте-

кает максимальный ток. Реле срабатывает и своими контактами К1 и К2 размыкает цепь питания нагревательного элемента $R_н$ и цепь, соединяющую термопару 2 с автоматическим электронным потенциометром КСП. Как только поверхность цилиндра охладится до температуры точки росы, на ней выпадет влага, и световой поток, падающий на фоторезистор *BL*, резко ослабится, что приведет к резкому снижению тока через обмотку реле. Реле отключается, контакты К1 и К2 замыкаются. Контакт К1 подключает термопару 2 к входу КСП и происходит измерение температуры точки росы, а следовательно, и относительной влажности. Нагревательный элемент получает питание, нагревает хладоноситель, и стенки цилиндра. Влага удаляется с зеркальной поверхности. Прибор приходит в исходное состояние, и цикл измерения повторяется.

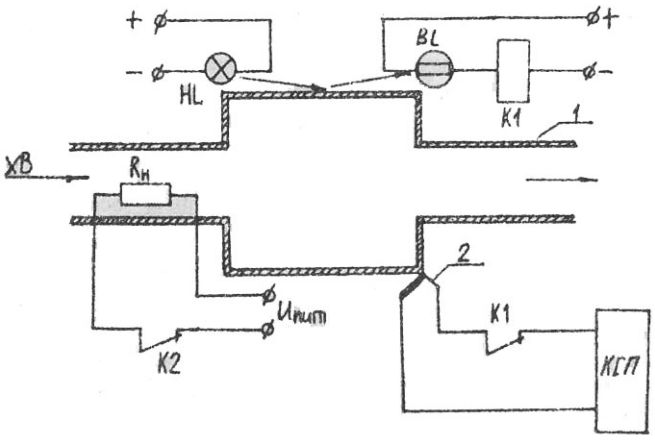



**Рис. 2.17. Схема метода точки росы**

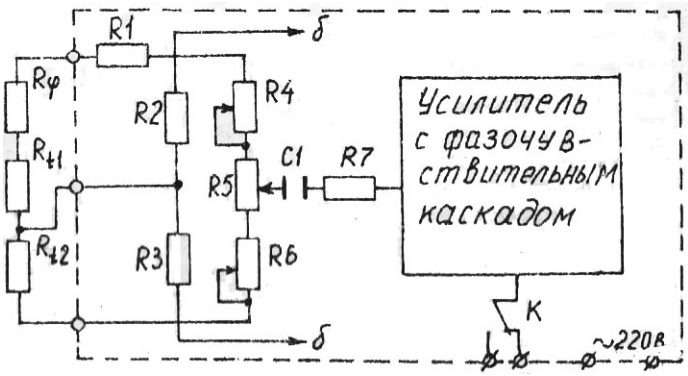



**Рис. 2.18. Схема электролитического метода**

Электролитический метод (рис. 2.18) основан на свойстве солей поглощать влагу из окружающей среды с последующей диссоциацией молекул на ионы и изменением электрической проводимости. В простейшем виде измерительный преобразователь представляет собой подложку из изоляционного материала, на которую нанесен слой соли, к которому подведены электроды для подачи питания.

В качестве соли обычно используется LiCl. Датчик $R_\varphi$ включается в мостовую измерительную схему вторичного прибора. На рис. 2.18 приведена принципиальная электрическая схема регулятора относительной влажности воздуха, применяемого при автоматизации систем кондиционирования воздуха. Температурная погрешность датчика компенсируется с помощью терморезисторов $R_{t1}, R_{t2}$. Задатчиком относительной влажности является потенциометр *R*5. Потенциометрами *R*4 и *R*6 измерительный мост настраивается в процессе изготовления и тарировки прибора.

При изменении относительной влажности на выходе измерительного моста формируется сигнал, управляющий выходным реле. Выходное реле через свои контакты К формирует сигнал на исполнительный механизм, обеспечивающий стабилизацию регулируемого параметра.

## Контроль влажности твердых и сыпучих материалов

При контроле влажности сыпучих материалов применяют следующие методы: кондуктометрический, диэлькометрический, нейтронный, микроволновый (СВЧ-метод) [4,7].

Кондуктометрический – это самый простой из электрических методов. Установка состоит из источника постоянного или переменного тока низкой частоты, двух электродов (обычно в форме игл), соединительных проводов, миллиамперметра и ячейки, заполненной материалом, влажность которого контролируется. Принцип действия: чем больше влажность материала, тем меньше его электрическое сопротивление, тем больше ток в цепи. Современные приборы измеряют электрическое сопротивление материала между иглами и по заложенной в память микропроцессора формуле вычисляют процентное содержание влаги. Для каждого материала используется своя полуэмпирическая зависимость вида $R = a / W^b$, где $a$ и $b$ – полуэмпирические параметры. Метод является весьма грубым, так как неизвестна концентрация солей в воде и неясно, за счет каких ионов осуществляется ток (ионов $H^+, OH^-$ или ионов солей). К достоинствам метода следует отнести простоту, несложный и быстрый способ измерения. Не-

достатками метода являются: 1) значительное влияние качества контакта игл с исследуемым материалом на результаты измерения; 2) невозможность измерения влажности ниже 5-8% портативными приборами. Для этого нужен источник высокого напряжения 500 – 1500 В, с помощью которого измеряют большие значения электрического сопротивления; 3) приходится частично разрушать исследуемый материал.

В диэлькометрическом методе используется зависимость диэлектрической проницаемости материала от его влагосодержания. Для воды относительная диэлектрическая проницаемость равна 81, а для сыпучих материалов она порядка нескольких единиц. Таким образом, диэлектрическая проницаемость материала сильно зависит от его влажности. В этом методе применяют высокочастотный генератор электромагнитных колебаний ($f \sim 10^6 – 10^7$ Гц, обычно 3 – 30 МГц), С ~ 10 пФ. В современных приборах датчики прижимают с усилием 5-10 Н к поверхности древесины или бетона и производят замер. ВЧ-токи проникают в материал на глубину 20-30 мм, прибор оценивает величину затухания токов, которая зависит от свойств материала и от его влажности. Микропроцессорный блок устройства пересчитывает величину $\varepsilon$ в абсолютную влажность. В памяти влагомера обычно хранятся данные о плотности материалов, на которые он рассчитан. Предварительный выбор пользователем породы древесины или марки бетона перед измерением увеличивает точность получаемых результатов. К достоинствам метода относятся: 1) высокая точность измерений и широкий диапазон измерения влажности; 2) высокая скорость получения результата замера; 3) влагомер не повреждает поверхность исследуемого материала.

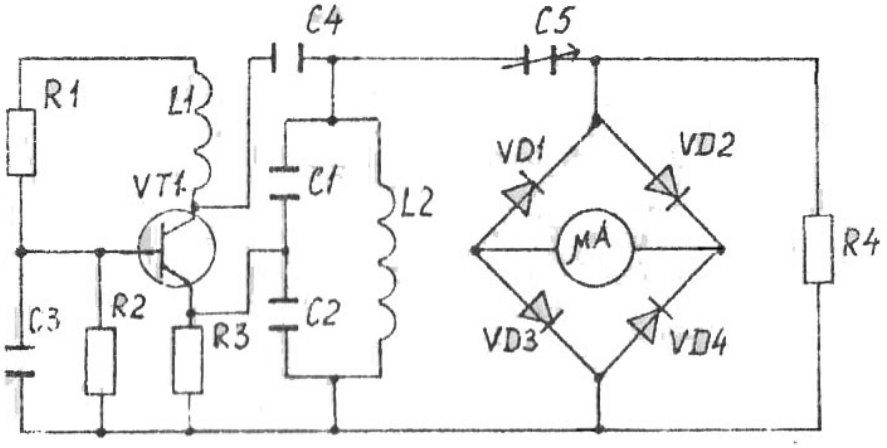



**Рис. 2.19. Схема диэлькометрического влагомера**

Диэлькометрический влагомер (рис. 2.19) состоит из конденсаторного датчика, заполняемого исследуемым материалом, и измерительного устройства, измеряющего полное сопротивление датчика, его емкостную или активную составляющие. Применяют резонансные, мостовые и дифференциальные схемы измерения, работающие в ВЧ- диапазоне. Для градуировки влагомера используют набор образцов с различными значениями влажности, определяемыми образцовым методом (методом высушивания).

Схема состоит из ВЧ-генератора на транзисторе VT1, емкостного датчика C5, выпрямительного моста на диодах VD1-VD4 и микроамперметра. При увеличении влажности материала, помещенного в емкостной датчик, увеличивается емкость конденсатора C5 и уменьшается его емкостное сопротивление, что приводит к увеличению тока через микроамперметр, включенный в диагональ выпрямительного моста.

Нейтронный метод измерения влажности основан на эффекте замедления быстрых нейтронов в процессе взаимодействия с протонами воды, содержащейся в материале. В этом методе применяется источник быстрых нейтронов. Сквозь небольшое отверстие поток нейтронов попадает на контролируемое вещество, а затем в приемник, содержащий инертный газ при давлении в несколько мм рт. ст. Быстрые нейтроны теряют свою энергию в основном при столкновении с протонами воды. При прохождении быстрых нейтронов с энергией $E > 0,5$ МэВ сквозь вещество в результате упругих столкновений с протонами воды они превращаются в медленные, которые, попадая в детектор, вызывают появление импульсов тока. Ионизация газа в приемнике осуществляется при столкновениях замедленных нейтронов с атомами инертного газа. Чем больше влажность материала, тем больше концентрация замедленных нейтронов, тем сильнее импульсы тока в приемной ионизационной камере. Этот метод - самый точный из имеющихся,

но требует надежной биологической защиты. Кроме того, здесь необходима коррекция на плотность испытуемого материала. Нейтронный метод применяют преимущественно для автоматизированного измерения влажности сыпучих материалов, а также для экспрессного измерения влажности бетонных и растворных смесей.

Микроволновый метод основан на просвечивании материалов микроволновым (СВЧ) электромагнитным излучением, характерная частота излучения которого составляет $\nu = 10^9 \div 10^{10}\ Гц$. Под действием электрического поля СВЧ-волны молекулы воды (диполи) начинают совершать колебательные и вращательные движения, ориентируясь преимущественно вдоль силовых линий электрического поля. Благодаря этому определенная часть энергии СВЧ-излучения поглощается. Концентрацию влаги измеряют по ослаблению СВЧ-излучения, проходящего через слой анализируемого материала. В таких влагомерах лента материала проходит между передающей и приемной антеннами. Передающая антенна соединена с СВЧ-генератором, приемная – с измерительным устройством. Чем больше влажность материала, тем слабее сигнал, попадающий в измерительное устройство. Из микроволновых влагомеров хорошо зарекомендовали себя MICRORADAR, M-SenS2, MOISTSCAN MA500, Franz Ludwig GmbH (Германия).

На практике применяются также влагомеры инфракрасного излучения (ИК). Принцип действия их основан на поглощении или отражении ИК-волн влагосодержащим материалом. Известностью пользуется ИК-влагомер Spectra-Quad.

## 2.6. Фотоэлектрические преобразователи

Фотопреобразователи основаны на внешнем и внутреннем фотоэффекте [4,7]. Внешний фотоэффект заключается в выбивании электронов из тел при облучении этих тел светом. Для большинства металлов внешний фотоэффект наблюдается в ультрафиолетовом спектре. Полное объяснение внешнего фотоэффекта было дано в 1905 г. А. Эйнштейном. Соотношение

$$h\nu = A_{вых} + \frac{mv^2}{2} \qquad (2.6.1)$$

называется уравнением Эйнштейна. В левой части уравнения стоит энергия светового кванта, в правой части - работа выхода электрона из тела и максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона. Это уравнение – необходимое условие для внешнего фотоэффекта, но недостаточное.

Внутренний фотоэффект заключается в поглощении полупроводниками квантов света и переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости. Достаточно слабого освещения, чтобы проводимость таких кристаллов увеличилась в десятки и сотни раз.

На практике используются вакуумные и газонаполненные фотоэлементы. В них реализован внешний фотоэффект. Широко используются также фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. В них реализован внутренний фотоэффект.

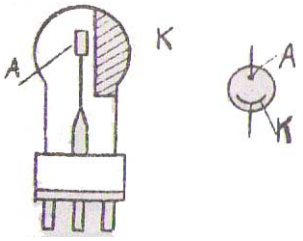



**Рис. 2.20. Схематическое устройство и условное обозначение вакуумного фотоэлемента**

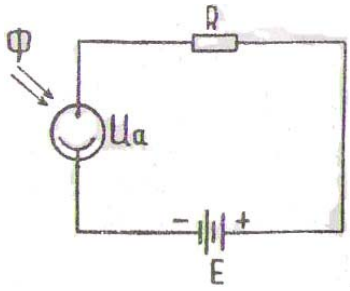



**Рис. 2.21. Схема включения фотоэлемента**

На рис. 2.22 – 2.24 показаны вольтамперные, световые и спектральные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.

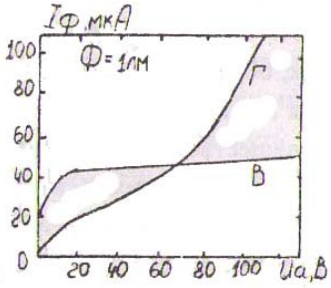



**Рис. 2.22. Вольтамперные характеристики (ВАХ) вакуумного и газонаполненного ФЭ**

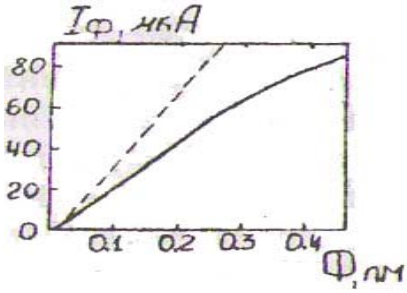



**Рис. 2.23. Световые характеристики вакуумного (сплошная кривая) и газонаполненного (пунктирная кривая) ФЭ**

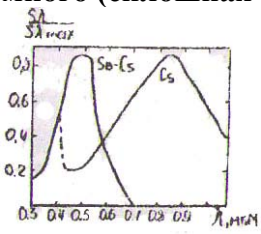



**Рис. 2.24. Спектральные характеристики вакуумного ФЭ**

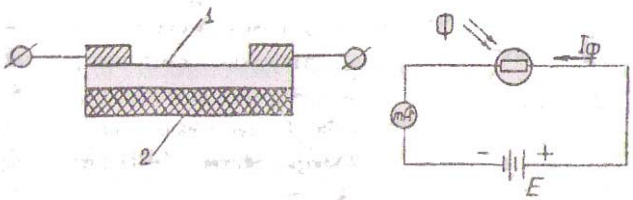



**Рис. 2.25. Схематическое устройство и схема включения фоторезистора**

## 2.7. Основные измерительные схемы

В автоматике наиболее часто применяются мостовые, потенциометрические и дифференциальные схемы измерения [6].

<u>Мостовые измерительные схемы</u>

Рассмотрим четырехплечный мост Уитстона (рис. 2.26.). Он имеет две диагонали: *ab* – диагональ питания и *cd* – выходная (измерительная) диагональ. У моста имеются 4 плеча. Можно показать, что выходное напряжения моста $U_{cd} \sim (R_1R_3 - R_2R_4)$. Состояние, когда $U_{cd} = 0$, называется равновесным. Условие равновесия легко можно получить из уравнений

Кирхгофа. Будем считать, что мост уравновешен. Тогда справедливы соотношения:

$$I_1 = I_2, I_3 = I_4, I_1R_1 = I_4R_4, I_2R_2 = I_3R_3. \qquad (2.7.1)$$

Исключая из них токи, получаем условие равновесия:

$$R_1R_3 = R_2R_4. \qquad (2.7.2)$$

<u>В состоянии равновесия произведения сопротивлений противоположных плеч моста попарно равны.</u>

Аналогичное условие равновесия справедливо для мостов переменного тока, когда в плечах моста находятся комплексные сопротивления:

$$Z_1Z_3 = Z_2Z_4. \qquad (2.7.3)$$

Здесь величины $Z_i$ – комплексные сопротивления плечей моста.

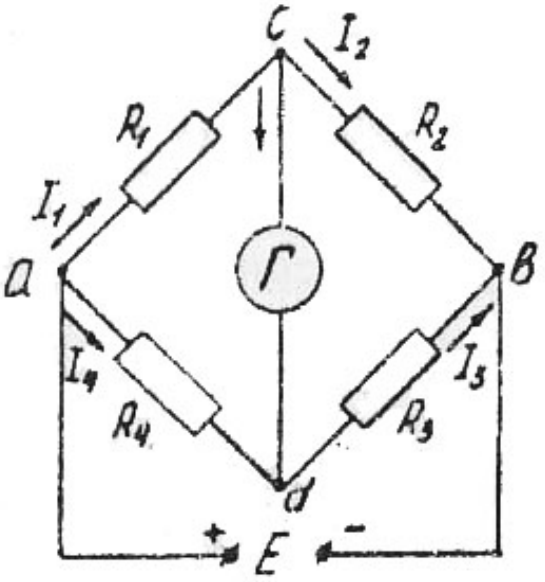



**Рис. 2.26. Мост Уитстона**

На рис. 2.27 представлена схема электронного автоматического моста Уитстона. Следует отметить, что в комплекте с мостовыми схемами работает большое число измерительных преобразователей. Например, термометры сопротивления, датчики перемещения, индуктивные датчики и т.д. На практике обычно применяют электронные автоматические мосты. Они применяются, например, при автоматизации процессов тепловой обработки строительных материалов в различных тепловых камерах.

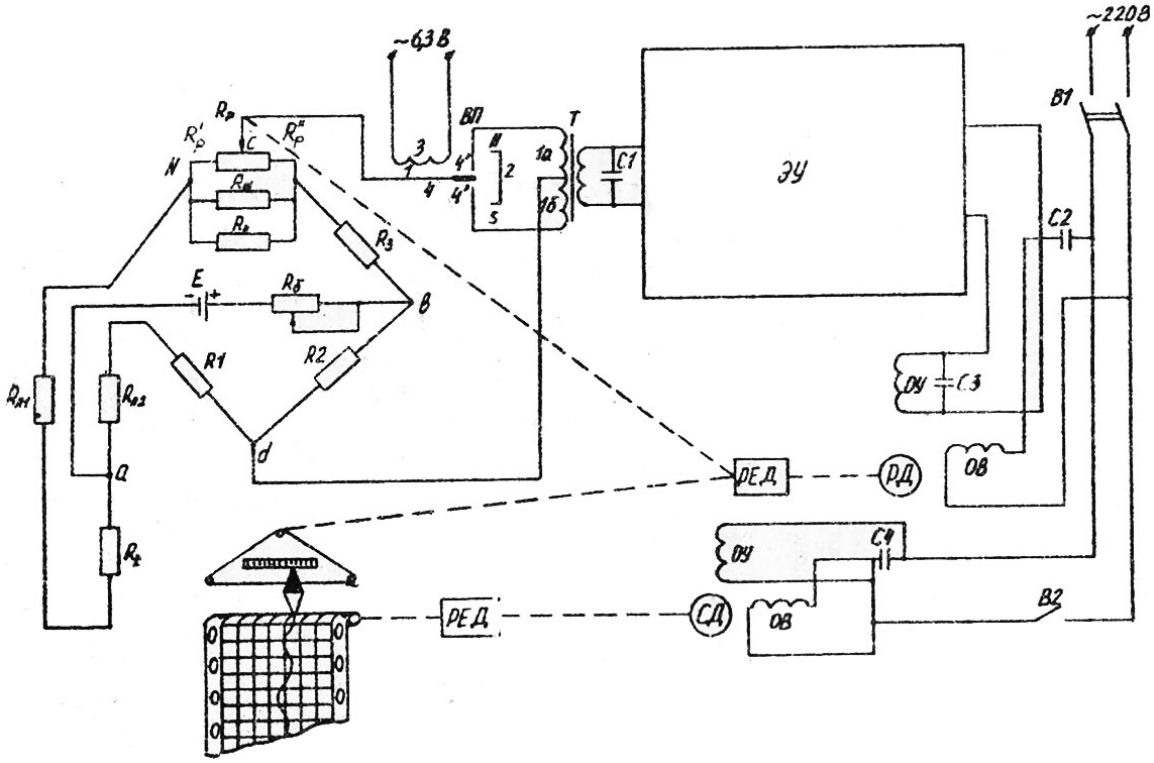



**Рис. 2.27. Электронный автоматический мост**

## Потенциометрические схемы

Для измерения напряжения или ЭДС с высокой точностью широкое распространение получил компенсационный метод. Суть этого метода заключается в следующем (рис. 2.28а). При перемещении подвижного контакта $b$ по реохорду потенциометра $R_p$ изменяется напряжение $U_n$ между точками $a$ и $b$. Можно подобрать такое положение подвижного контакта $b$, чтобы ток через гальванометр $Г$ был равен нулю. При этом измеряемое напряжение $U_x$ полностью компенсируется напряжением $U_n$. Таким образом, каждому значению напряжения $U_x$ соответствует определенное положение контакта потенциометра $b$, при котором гальванометр $Г$ имеет нулевое показание. Следовательно, по положению стрелки, механически связанной с подвижным контактом потенциометра, можно производить отсчет измеряемой величины $U_x$.

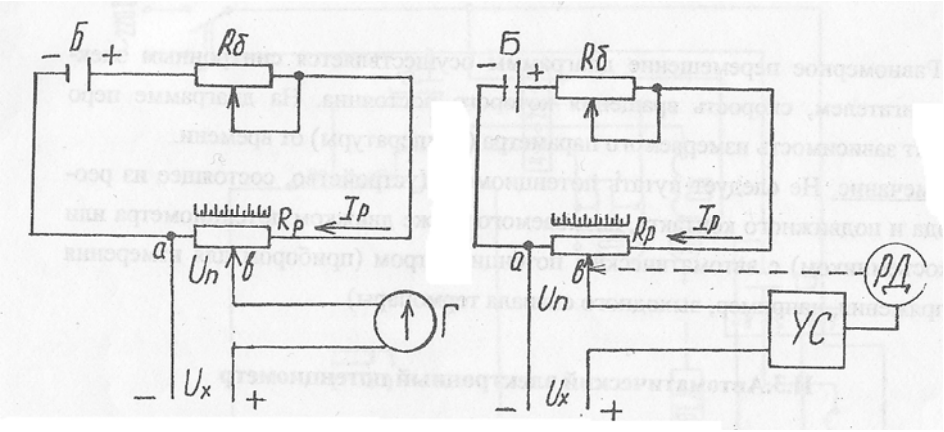



**Рис. 2.28. Потенциометрическая измерительная схема**

Для того, чтобы компенсирующее напряжение $U_n$ зависело только от положения подвижного контакта потенциометра, необходимо, чтобы по реохорду потенциометра протекал заданный ток, называемый рабочим током $I_p$. Этот ток регулируется реостатом $R_б$. Процесс измерения может быть автоматизирован путем замены гальванометра *Г* усилителем *УС* (рис. 2.28б), выходное напряжение которого подается на реверсивный двигатель *РД*, перемещающий подвижный контакт потенциометра до положения равновесия (баланса), при котором $U_x = U_n$. Таким образом, автоматически отрабатывается разбаланс измеряемого $U_x$. и компенсирующего $U_n$. напряжений. В режиме компенсации напряжение на входе усилителя равно нулю, и *РД* не работает. С подвижным контактом потенциометра через редуктор связаны: стрелка, по положению которой производится отсчет показаний; перо, записывающее показания прибора на диаграмме, кулачки сигнализатора и регулятора, включающие соответствующие контакты при заданном показании прибора.

Равномерное перемещение диаграммы осуществляется синхронным электродвигателем, скорость вращения которого постоянна. На диаграмме перо чертит зависимость измеряемого параметра (температуры) от времени.

## Автоматический электронный потенциометр

Упрощенная схема автоматического потенциометра приведена на рис. 2.29. Источником компенсирующего напряжения является мостовая схема. Напряжение, компенсирующее ЭДС термопары, снимается с одной из диагоналей моста (между вершинами 8 и 9).Источник питания включен в диагональ питания моста между двумя другими его вершинами (5 и 11).

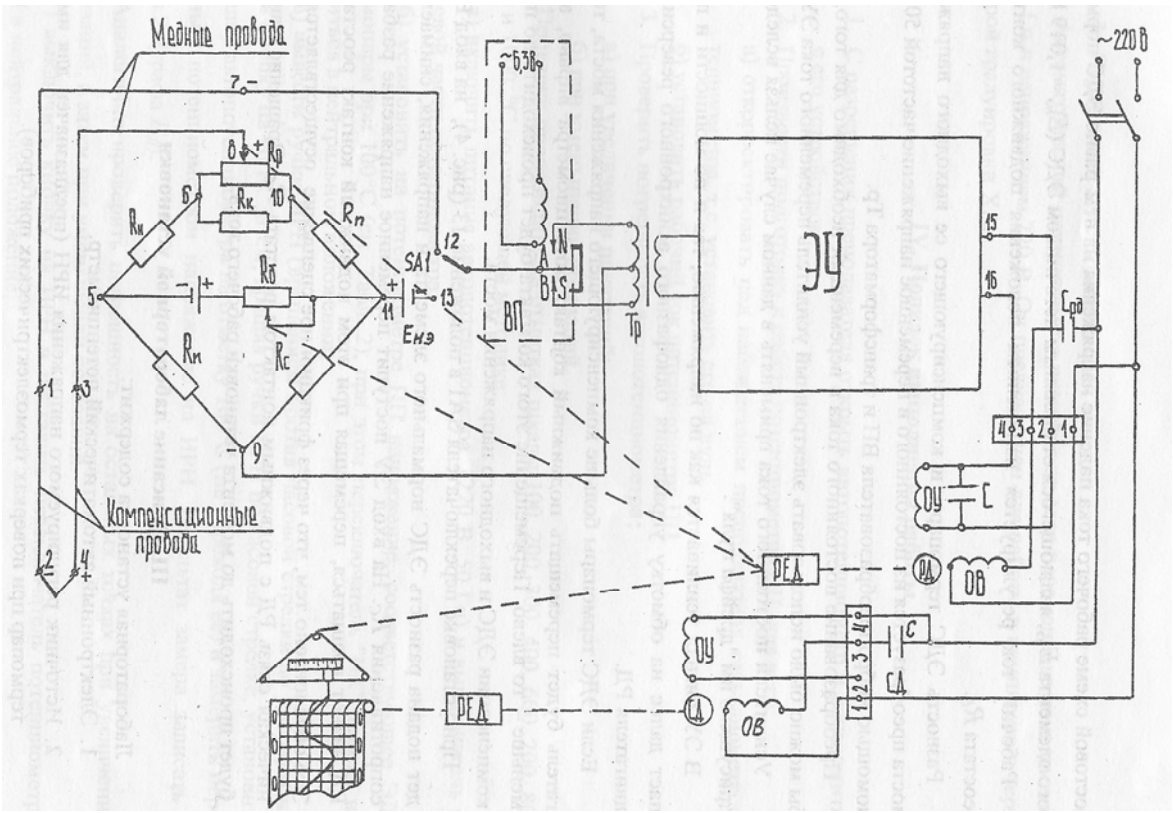



**Рис. 2.29. Схема электронного автоматического потенциометра**

При положении стрелки автоматического потенциометра на начальной отметке шкалы подвижный контакт потенциометра находится в крайнем левом положении. Перемещение подвижного контакта вправо приводит к увеличению напряжения на выходе моста (между точками 8 и 9). Максимальное значение компенсирующего напряжения снимается при правом крайнем положении подвижного контакта потенциометра. Соответствующим выбором величин резисторов $R_н$, $R_k$, $R_п$ можно регулировать пределы изменения компенсирующего напряжения на выходе моста. Все резисторы мостовой схемы, кроме резистора $R_м$, выполнены из провода, сопротивление которого практически не зависит от температуры. Сопротивление $R_м$ выполнено из медного провода и помещается рядом со свободными концами термопары, что обеспечивает равенство их температур. Сопротивление $R_м$ выбрано таким образом, что напряжение между точками 8 и 9 изменяется на ту же величину, на которую изменяется ЭДС термопары вследствие изменения температуры ее свободных концов, в результате чего автоматически вводится поправка на величину ЭДС свободных концов термопары.

Величина сопротивления $R_c$ выбрана так, что при протекании по мостовой схеме рабочего тока падение напряжения на нем равно ЭДС нормального элемента $E_{нэ}$, являющегося стабильным источником ЭДС ($E_{нэ}$ = 1,0195 В).

Рабочий ток регулируется изменением положения подвижного контакта реостата $R_б$.

Разность ЭДС термопары и компенсирующего ее выходного напряжения преобразуется из постоянного в переменное напряжение частотой 50 Гц с помощью вибропреобразователя *ВП* и трансформатора *Тр*.

Преобразование постоянного тока в переменный необходимо для того, чтобы можно было использовать электронный усилитель переменного тока *ЭУ*.

Усилители постоянного тока применять в данном случае нежелательно вследствие присущего им «дрейфа нуля».

В ЭУ сигнал усиливается как по напряжению, так и по мощности и поступает далее на обмотку управления однофазного асинхронного реверсивного двигателя РД.

Если ЭДС термопары больше компенсирующего напряжения моста, то двигатель будет перемещать подвижный контакт потенциометра вправо, а если меньше – то влево. Перемещение этого контакта будет происходить до полной компенсации ЭДС и выходного напряжения моста.

При установке переключателя SA1 в положение 13 (рис. 29), на вход *ВП* будет подана разность ЭДС нормального элемента и напряжения, снимаемого с сопротивления $R_c$. На вход ЭУ поступит переменное напряжение разбаланса, *РД* начнет вращаться, перемещая при этом подвижный контакт реостата $R_б$. Это обусловлено тем, что через фрикционное сцепление осуществляется механическая связь *РД* с подвижным контактом реостата $R_б$. Вращение двигателя будет происходить до момента установки рабочего тока.

## Дифференциальная измерительная схема

Дифференциальной измерительной схемой называется электрическая цепь, состоящая из двух смежных контуров (рис. 2.30). В каждом контуре действует своя электродвижущая сила. Измерительный прибор включен в ветвь, общую для двух контуров.

Такая схема удобна в случае использования индуктивных датчиков. В этом случае $Z_1$ и $Z_2$ являются сопротивлениями этих датчиков. Дифференциальная схема проще мостовой и в некоторых случаях имеет более высокую чувствительность.

Измерительный прибор, включенный в общую ветвь, показывает разность контурных токов. Разность токов появляется в результате изменения одной или обеих ЭДС или в результате изменения одного или обоих сопротивлений. Наиболее часто датчиками являются сопротивления. Если $Z_1$ и $Z_2$ являются сопротивлениями дифференциального индуктивного дат-

чика, то увеличение тока прибора будет происходить под действием обоих контурных токов, что увеличивает чувствительность.

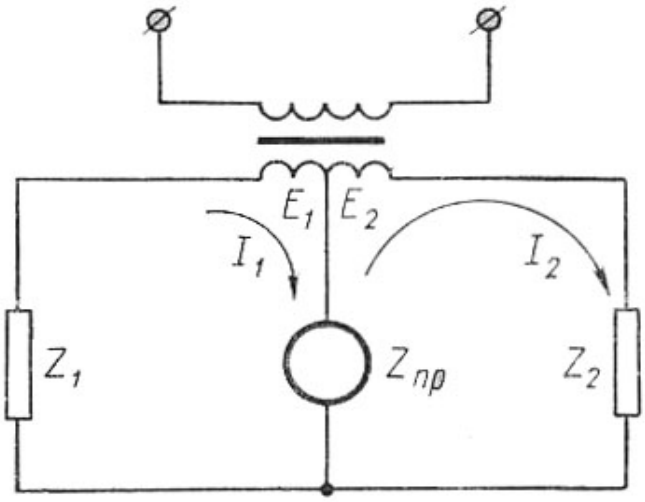



**Рис. 2.30. Дифференциальная измерительная схема**

## 2.8. Измерительные преобразователи давления

Давление в системе СИ измеряется в Паскалях: 1 Па = Н/м$^2$. Широко используются внесистемные единицы: нормальная, физическая, техническая атмосферы. Нормальная атмосфера – это давление столба ртути высотой 760 мм при нормальных условиях, т.е. при температуре 0ºС. Давление, оказываемое столбом жидкости высотой $h$ дается формулой $p = \rho g h$. Имеют место соотношения:

Нормальная атмосфера: 760 мм рт. ст. = $1{,}013 \cdot 10^5$ Па,

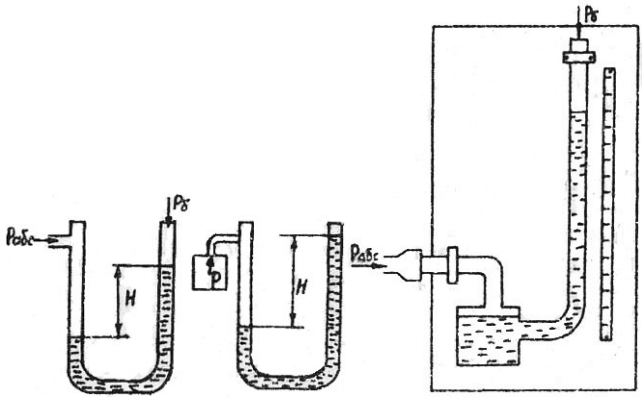
Физическая атмосфера (1 бар): = 750 мм рт. ст. = $10^5$ Па,

Техн. атмосфера = 735,6 мм рт. ст. = $0{,}98.10^5$ Па = 10 м вод. ст.

В честь Торричелли назвали: 1 мм рт. ст. = 1 Торр.

Измерительные преобразователи давления можно классифицировать по следующим группам: жидкостные, пружинные, электрические, комбинированные [4,5,10,11].

В <u>жидкостных преобразователях давления</u> в качестве жидкости используются: ртуть, вода, этиловый спирт, керосин, глицерин. Типичный жидкостной манометр представляет собой $U$-образную трубку, размещенную на доске со шкалой. Один конец трубки (заполненной наполовину рабочей жидкостью), соединяется с пространством, в котором измеряется давление, а другой конец оставляют открытым. Измеряемое давление определяют через разность показаний в левом и правом колене. Предел измерений жидкостных манометров не превышает 1,5-2 атм.




а) б) в)

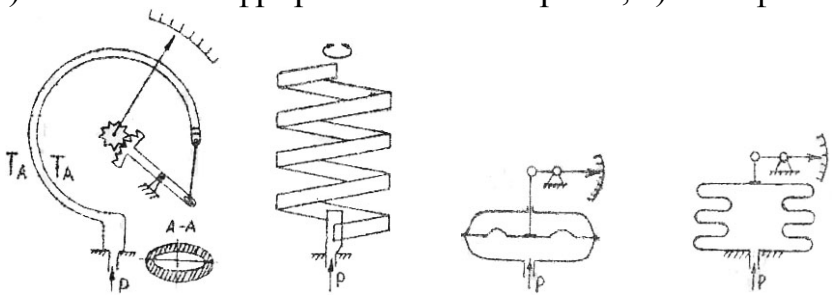
**Рис. 2.31. Жидкостные манометры**

На рис. 2.31 представлены некоторые виды жидкостных манометров. Наиболее распространенным прибором является *U*-образный манометр (рис. 2.31 а, б). Широкое распространение получили также однотрубные чашечные микроманометры (рис. 2.31 в). Высота столба жидкости в трубке чашечных манометров или разность уровней жидкости в *U*-образных манометрах пропорциональны измеряемому избыточному давлению: $P_{изб} = H\gamma$, где $\gamma$ - удельный вес рабочей жидкости. Измерение давления сводится к измерению высоты столба жидкости *H*.

## Пружинные манометры

Пружинные манометры относятся к наиболее распространенным приборам для измерения давления. Диапазон измеряемых давлений их чрезвычайно широк: от вакуума до $10^3$ МПа. Принцип действия этих манометров основан на уравновешивании силы, возникающей под действием измеряемого давления, силой упругой деформации чувствительного элемента прибора: $P = \kappa H$, где $\kappa$ – коэффициент упругости материала чувствительного элемента, *H* – величина деформации (перемещения) чувствительного элемента.

В качестве чувствительных элементов (ЧЭ) используются пружины следующих типов: а) одновитковые трубчатые; б) многовитковые (геликоидальные); в) плоские и гофрированные мембраны; г) сильфоны.




а) б) в) г)

**Рис. 2.32. Пружинные манометры**

Одновитковая трубчатая пружина или трубка Бурдона (рис. 2.32 а) представляет собой стальную или латунную трубку овального сечения, согнутую по дуге окружности почти на 270°. Один конец трубки соединен со штуцером, через который во внутреннюю полость трубки поступает среда, давление которой измеряется, а второй (свободный конец) запаян. Под действием измеряемого давления в металле трубки возникают механические напряжения, в результате которых свободный конец совершает перемещение. Конец пружины через поводок поворачивает зубчатый сектор и зубчатую шестерню (трибку) и вместе с нею указательную стрелку. При подаче на вход манометра избыточного давления трубка разгибается, а в случае разрежения – сгибается.

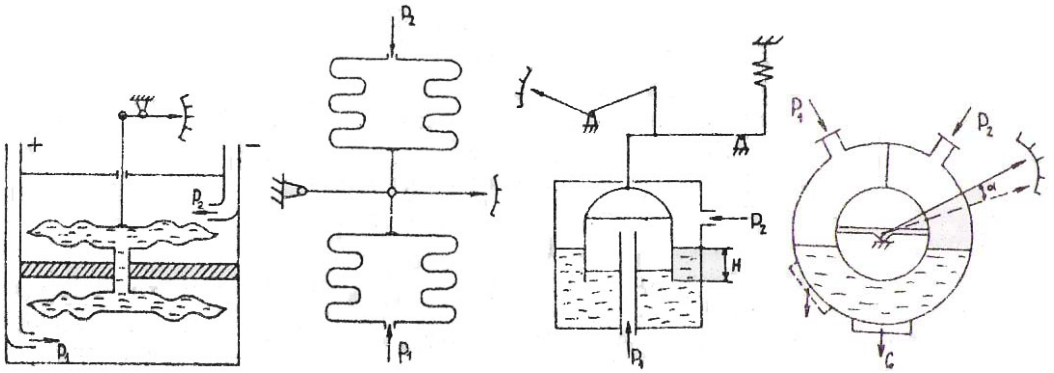
Многовитковая трубчатая пружина (рис. 2.32 б) обычно выполняется в виде винтовой пружины, что позволяет повысить чувствительность прибора. Угол поворота свободного конца трубки достигает 60°, при количестве витков от 6 до 9. Манометры с такой пружиной выпускаются чаще всего как самопишущие.

Мембранные манометры имеют в качестве ЧЭ упругие или эластичные (вялые) мембраны. Упругая мембрана – это гибкая круглая плоская или гофрированная пластина, способная прогибаться под действием давления. Эластичная мембрана, предназначенная для измерения малых давлений, представляет собой плоские или гофрированные диски, выполненные из прорезиненной ткани и зажатые между фланцами.

Измеряемое давление действует на мембрану, мембрана прогибается и воздействует на шток, соединенный со стрелкой (рис. 2.32 в).

Основой сильфонных манометров служит сильфон – тонкая цилиндрическая металлическая оболочка с поперечными гофрами (рис. 2.32 г), способная совершать значительные перемещения под действием давления или силы. Деформация сильфона вызывает перемещение штока и стрелки прибора.

Дифференциальные манометры




а) б) в) г)

**Рис. 2.33. Дифференциальные манометры**

Для измерения разности давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ применяют дифференциальные манометры. Наиболее часто используются мембранные, сильфонные, колокольные и кольцевые дифманометры (рис. 2.33).

Чувствительным элементом мембранного дифманометра (рис. 2.33а) является блок из двух коробчатых мембран, помещенных в отдельные камеры. Внутренние полости мембран, заполненные дистиллированной водой, сообщаются между собой через отверстие в перегородке. Мембранная коробка, на которую действует большее давление, сжимается, вода вытесняется в другую коробку, стенки которой расходятся. Шток, жестко закрепленный к центру верхней мембраны, перемещается пропорционально разности давлений.

Принцип действия сильфонного дифманометра (рис. 2.33б) аналогичен. Вместо мембран здесь используются сильфоны. Связь между перемещением штока $H$ и перепадом давлений $\Delta P$ выражается зависимостью $\Delta P = \kappa H$, где $\kappa$ – постоянный для данного дифманометра коэффициент.

Чувствительным элементом колокольного дифманометра является колокол, погруженный в масло (рис. 2.33в). Силы, действующие на колокол со стороны большего из давлений, превышают силы, действующие со стороны меньшего давления. Под действием этих сил колокол перемещается, приводя в движение стрелку. Зависимость между разностью давлений и глубиной погружения колокола выражается уравнением: $\Delta P = K_1 - K_2 H$, где $K_1$ и $K_2$ – постоянные коэффициенты.

Кольцевой дифманометр (Рис. 2.33г) представляет собой прозрачное кольцо, наполовину заполненное рабочей жидкостью и разделенное герметичной перегородкой на две части (полости). К полостям над жидкостью подведены гибкие трубки для подачи давлений, а в центре вращения установлена ножевая опора. Для варьирования пределов измерения изменяют вес прикрепленного к кольцу груза.

Зависимость между перепадом давлений и углом поворота кольца выражается уравнением:

$$\Delta P = Ga \sin\alpha / (SR) . \qquad (2.8.1)$$

Здесь $G$ – вес груза, $a$ – расстояние от центра тяжести груза до оси вращения, $S$ – площадь перегородки, $R$ – средний радиус кольца, $\alpha$ - угол поворота кольца.

## Дифференциально-трансформаторная система передачи

Системы передачи измерительной информации предназначены для сбора информации с удаленных от наблюдателя объектов. Используются следующие унифицированные системы передачи: пневматическая, электрическая токовая, электрическая частотная. Кроме этих систем применя-

ются: реостатная, индуктивная, дифференциально-трансформаторная, сельсинная и др. дистанционные передачи.

Диффенциально-трансформаторная система передачи (рис. 2.34) состоит из первичного измерительного преобразователя, включающего в себя чувствительный элемент ЧЭ и дифференциально-трансформаторный преобразователь ДТ1, и приемника информации, в качестве которого используется вторичный прибор дифференциально-трансформаторного типа, оснащенный преобразователем ДТ2. Первичные обмотки ДТ-преобразовательных элементов соединены между собой последовательно и питаются от сети переменного тока. Вторичные обмотки ДТ-преобразовательных элементов включены по компенсационной схеме, в которой на вход электронного усилителя ЭУ поступает сигнал $\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2$. При протекании тока в первичных обмотках в секциях вторичных обмоток индуцируются ЭДС, величина и фаза которых зависят от положений стальных плунжеров, перемещающихся внутри катушек.

При одинаковых положениях плунжеров $\Delta U_1 = \Delta U_2$ и на входе ЭУ $\Delta U = 0$. Система находится в состоянии равновесия. Изменение измеряемого параметра вызывает деформацию ЧЭ, сопровождаемую перемещением плунжера преобразователя ДТ1. На его выходе появляется сигнал $\Delta U_1$, отличный от сигнала $\Delta U_2$. В результате на входе усилителя появляется сигнал $\Delta U$, отличный от нуля. Усиленное напряжение разбаланса подается на обмотку реверсивного двигателя РД, который перемещает плунжер преобразователя ДТ2 в сторону уменьшения разбаланса, вплоть до полной компенсации. Таким образом, каждому положению плунжера катушки датчика соответствует аналогичное положение плунжера катушки приемника. С осью реверсивного двигателя кроме плунжера кинематически связаны также показывающее и записывающее устройства.

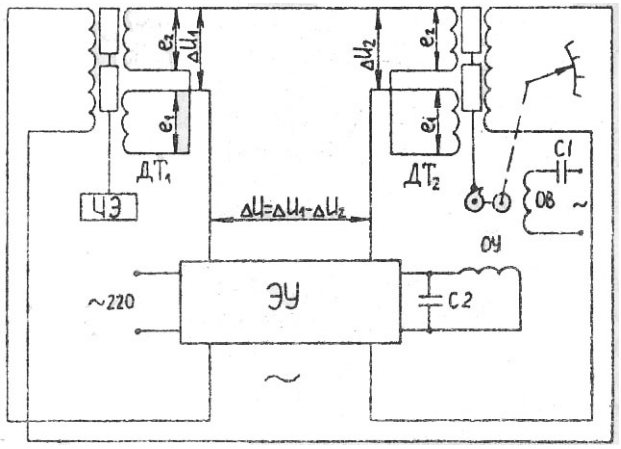


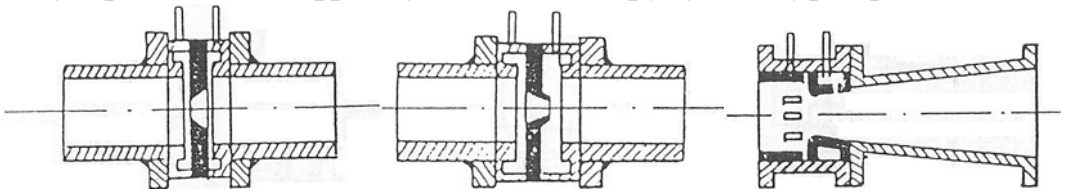

**Рис. 2.34. Схема дифференциально-трансформаторной дистанционной передачи**

## 2.9. Измерительные преобразователи расхода. Счетчики

Расход вещества – это количество вещества, проходящее через технический аппарат за единицу времени. Различают два типа приборов: счетчики количества и расходомеры. Часто расходомеры снабжаются интегрирующими устройствами, т.е. одновременно являются и счетчиками. Счетчики бывают скоростные, объемные и весовые. Бывают счетчики жидкости и газа. Наиболее часто применяются скоростные счетчики. Чувствительным элементом в них является крыльчатка или вертушка, помещенная в поток жидкости или газа. Угловая скорость чувствительного элемента пропорциональна средней скорости потока. Количество прошедшего вещества пропорционально числу оборотов чувствительного элемента. С помощью передаточных механизмов типа редукторов число оборотов преобразуется в изменение положения измерительной стрелки. В объемных счетчиках учитывается количество объемов, прошедших через счетчик. Из расходомеров на практике используются: 1) расходомеры с переменным перепадом давлния; 2) расходомеры с постоянным перепадом давления; 3) напорные трубки и анемометры; 4) ультразвуковые расходомеры; 5) индукционные расходомеры [4,5,7,10,11].

Метод переменного перепада давления

Этот метод широко применяется для измерения расхода жидкостей и газов. Идея метода состоит в том, что на трубопроводе устанавливают сужающее устройство: диафрагму, сопло или трубу Вентури (рис. 2.35).



а) б) в)

**Рис. 2.35. Сужающие устройства, применяемые для измерения расхода жидкостей и газов: а –диафрагма; б – сопло; в – труба Вентури**

В результате в месте сужения скорость потока увеличивается, а статическое давление уменьшается. Измерение расхода жидкости (газа) сводится к измерению перепада давления на сужающем устройстве дифференциальным манометром.

Рассмотрим среднюю линию тока жидкости, проходящую по оси симметрии. Запишем для нее уравнение Бернулли и уравнение сохранения вещества:

$$\frac{\rho_1 v_1^2}{2} + p_1 + \rho_1 g h_1 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + p_2 + \rho_2 g h_2 \ , \qquad (2.9.1)$$

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 \, . \qquad (2.9.2)$$

Учитывая, что $h_1 = h_2, \rho_1 = \rho_2$, из уравнений (2.9.1) и (2.9.2) получаем для объемного расхода:

$$Q = k\sqrt{p_1 - p_2} = \mathrm{k}\sqrt{\Delta p} \ , \qquad (2.9.3)$$

где $k$ – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей прибора.

Любое сужающее устройство представляет возмущение для набегающего потока. В результате часть механической энергии потока переходит в тепловую (диссипация). В результате безвозвратно теряется часть статического давления. На рис. 2.36 и 2.37 проиллюстрирован данный метод измерения.

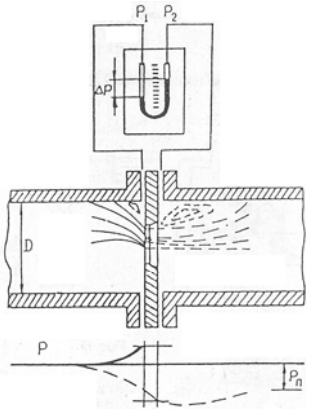



**Рис. 2.36. Схема измерения расхода дифманометром**

Для определения перепада давлений может применяться либо один дифференциальный датчик, либо два датчика абсолютного давления. Для линеаризации выходного сигнала датчика сигнал с его выхода передается в микропроцессор, который выполняет стандартную процедуру извлечения квадратного корня. Достоинствами метода определения расхода жидкостей по перепаду давления является отсутствие механических компонентов и возможность использования стандартных датчиков давления, а недостатком – нарушение потока сужающими устройствами или иными резистивными элементами [5].

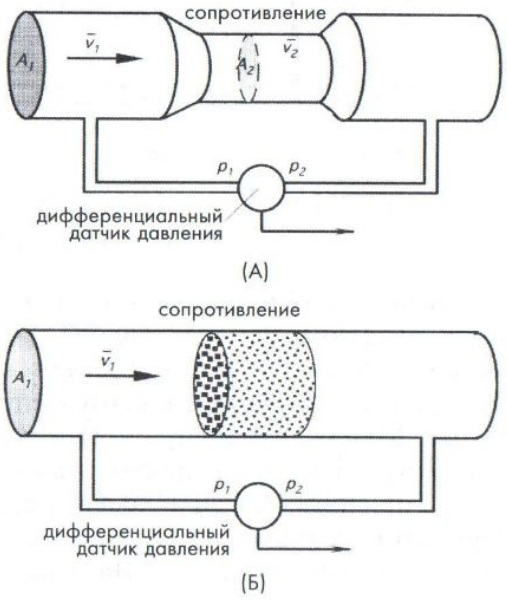



**Рис. 2.37. Два типа элементов, оказывающих сопротивление потоку: узкий участок трубки (А) и пористая пробка (Б)**

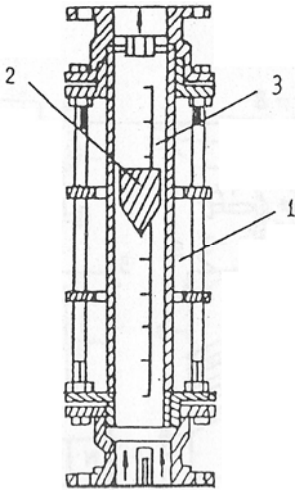



**Рис. 2.38. Схема ротаметра**

Метод постоянного перепада давления реализован в приборах – ротаметрах (рис. 2.38). Ротаметры содержат полую коническую трубку, сужающуюся вниз, т.е. усеченный конус. Внутри этой трубки размещен ротор-поплавок. В нижнем положении поплавок плотно прикрывает входное сечение. Жидкость, расход которой контролируется, подается через ротаметр снизу вверх. Под ее напором ротор-поплавок поднимается вверх. Между ним и стенками конуса образуется кольцевой зазор, и жидкость устремляется вверх. Высота подъема поплавка зависит от расхода жидкости (газа). Рассмотрим силы, действующие на поплавок: сила тяжести $mg$,

сила давления со стороны потока снизу, сила давления жидкости сверху. Поплавок установится на такой высоте, на которой алгебраическая сумма этих сил обращается в нуль. На поплавок наносятся винтовые линии (винтовая нарезка). Поэтому он вращается и стремится расположиться вследствие этого в центре потока. Это необходимо для повышения точности измерений. В промышленности выпускают десятки типов ротаметров: визуальные и с дистанционной передачей.

Электромагнитные расходомеры применяют для измерения расхода электропроводных жидкостей. На ион, движущийся со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, действует сила Лоренца $\vec{F}_л = q[\vec{v}\vec{B}]$. В магнитном поле, охватывающем трубопровод, происходит разделение положительных и отрицательных ионов, создается ЭДС. По измерениям этой ЭДС определяют расход жидкости. Рис. 2.39 иллюстрирует данный метод.

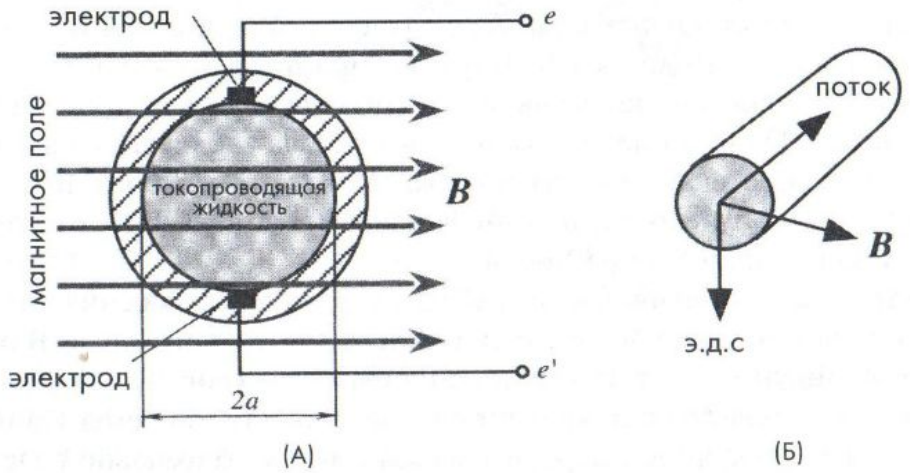



**Рис. 2.39. Принцип работы электромагнитного расходомера:**
**А – положение электродов перпендикулярно магнитному полю;**
**Б – взаимосвязь между потоком и векторами электрического и магнитного полей [5]**

На практике применяются также ультразвуковые расходомеры [5].

Ультразвуковые датчики для определения скорости потока измеряют скорость звука вдоль и против течения. На рис. 2.40 показаны два ультразвуковых генератора, расположенные на двух противоположных сторонах трубы, по которой течет поток жидкой среды. В качестве ультразвуковых генераторов, как правило, используются пьезоэлектрические кристаллы [5]. Каждый кристалл может использоваться либо для возбуждения ультразвуковых волн, либо для их приема.

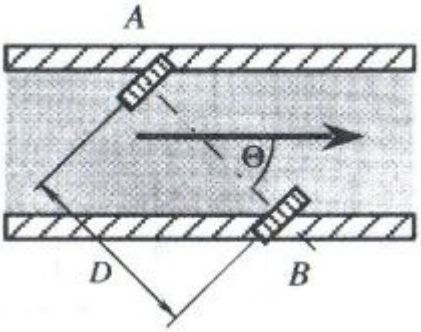



**Рис. 2.40. Ультразвуковой расходомер**

Кристаллы расположены на расстоянии $D$ друг от друга под углом $\theta$ по отношению к направлению потока. Также возможно располагать небольшие кристаллы прямо внутри трубы строго по направлению потока ($\theta = 0$). Время распространения звука между кристаллами $A$ и $B$ связано со средней скоростью потока $v_c$ следующим соотношением:

$$t = \frac{D}{v_{зв} \pm v_c \cos\theta} \ . \qquad (2.9.4)$$

где $v_c$ – это скорость потока, усредненная вдоль пути распространения ультразвука. Из этого выражения получаем для разности времен распространения ультразвука вдоль и против течения:

$$\Delta t = \frac{2Dv_c \cos\theta}{v_{зв}^2 + v_c^2 \cos^2\theta} \approx \frac{2Dv_c \cos\theta}{v_{зв}^2} \ . \qquad (2.9.5)$$

Измеряя $\Delta t$, определяют среднюю скорость потока.

## 2.10. Измерительные преобразователи уровня сыпучих материалов и жидкостей

Для измерения уровня сыпучих и жидких материалов используется множество различных приборов. На рис. 2.41 представлены некоторые из них: а) метод измерения – сообщающиеся сосуды; б) поплавковый уровнемер; в) мембранный уровнемер; г) уровнемер-дифманометр; д) емкостной уровнемер; е) электрический уровнемер сыпучих материалов; ж) радиоактивный уровнемер.

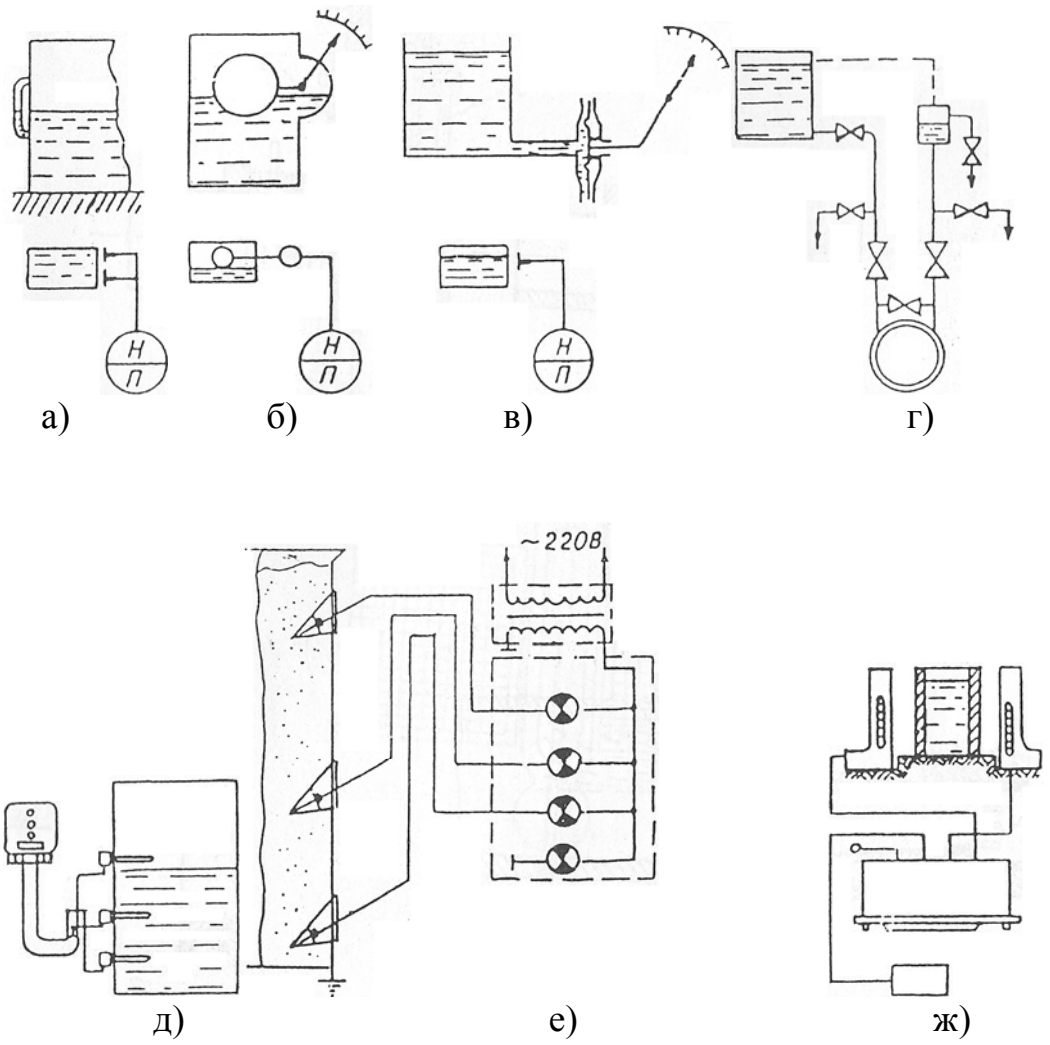



**Рис. 2.41. Схемы уровнемеров:**
**а) визуальный уровнемер; б) поплавковый уровнемер; в) мембранный уровнемер; г) дифманометр-уровнемер; д) емкостной уровнемер; е) контактный уровнемер; ж) радиоактивный уровнемер**

# ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

## 3.1. Виды и задачи автоматического регулирования и управления

Управлением в широком смысле слова называется организация какого-либо процесса, направленная на достижение поставленной цели. Основой управления является переработка информации о состоянии системы в соответствии с принятой целью [9].

Системы, управление которыми осуществляется техническими устройствами без непосредственного участия человека, называются автоматическими (рис. 3.1а). Однако в ряде случаев человек должен непосредственно участвовать в управлении или контролировать и корректировать работу автоматики. В связи с этим он включается в основной или во вспомогательный контуры управления (рис. 3.1б). Если человек включается в основной контур, то техническая система называется полуавтоматической.

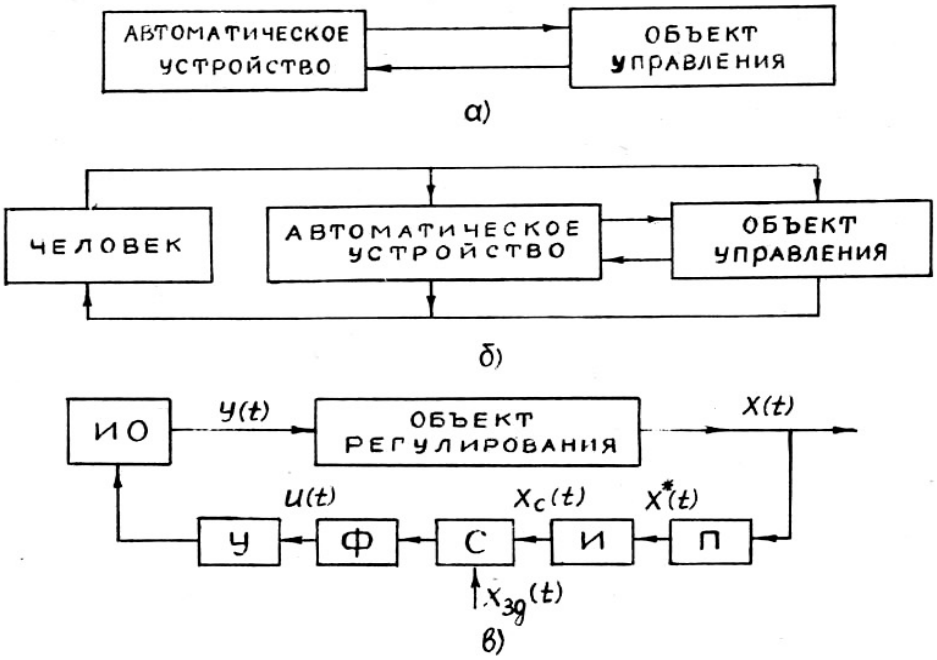



**Рис. 3.1**

Управление автоматическими системами может осуществляться в виде автоматического регулирования или в виде собственно автоматического управления.

Под автоматическим регулированием понимается поддержание регулируемой величины вблизи заданного значения или изменение ее по заданному закону, осуществляемое посредством измерения состояния объекта (или действующих на него возмущений) и воздействия на регулирующий орган объекта.

Под автоматическим управлением понимается автоматическое осуществление совокупности воздействий, выбранных из множества возможных на основе определенной информации и направленных на поддержание и улучшение функционирования управляемого объекта. Автоматическое управление охватывает более широкий круг задач, чем автоматическое регулирование, - таких как адаптация или самонастройка систем управления в соответствии с изменением ее параметров или различных внешних воздействий, обеспечение оптимального функционирования систем управления при изменяющихся условиях, автоматический выбор режимов из нескольких возможных и др.

Простейшая система автоматического регулирования (САР) образуется из объекта регулирования и регулирующего устройства, или просто регулятора (рис.3.1в). Регулятор обычно включает в себя следующие элементы: преобразовательный П, измерительный И, сравнивающий С, формирующий Ф, усилительно-преобразовательный У и исполнительный ИЭ.

Преобразовательный элемент служит для преобразования регулируемой величины $X(t)$ в однозначно соответствующую ей величину $X^*(t)$, удобную для передачи и дальнейшего использования в регуляторе.

Измерительный элемент на основе сигнала $X^*(t)$ вырабатывает сигнал $X_c(t)$,который поступает на элемент сравнения С, вырабатывающий сигнал рассогласования $X_{зд}(t) - X_c(t)$ (где $X_{зд}(t)$ характеризует заданное значение регулируемой величины). Сигнал рассогласования поступает на вход устройства Ф формирования управляющего сигнала $U(t)$. Если мощность сигнала $U(t)$ недостаточна для эффективного воздействия на исполнительный элемент системы, то в цепь сигнала вводится усилительно-преобразовательный элемент *У*, - например, гидравлический, электромашинный или электронный усилитель мощности.

В качестве измерительных элементов могут использоваться различные датчики, например, центробежный маятник, тахогенератор, термопара, термометр сопротивления. Элементами сравнения могут служить электромагнитные и трансформаторные системы, электрические мостовые и потенциометрические схемы и др.

## 3.2. Основные свойства САР

Различают два режима работы автоматических систем: статический, или установившийся, равновесный, при котором все входные и выходные координаты системы постоянны во времени, и динамический (переходный), соответствующий движению системы под влиянием управляющего воздействия или возмущения, когда координаты системы изменяются во времени. Поведение системы в указанных режимах описывается статиче-

скими и динамическими характеристиками и, соответственно, алгебраическими и дифференциальными уравнениями.

Переходные процессы в САР могут возникать при самых различных управляющих воздействиях и внешних возмущениях или отклонениях начальных условий (например, при скачкообразном изменение воздействия, подаче различных импульсов, периодических возмущений и т.д.) и могут иметь самый различный вид (рис. 3.2).

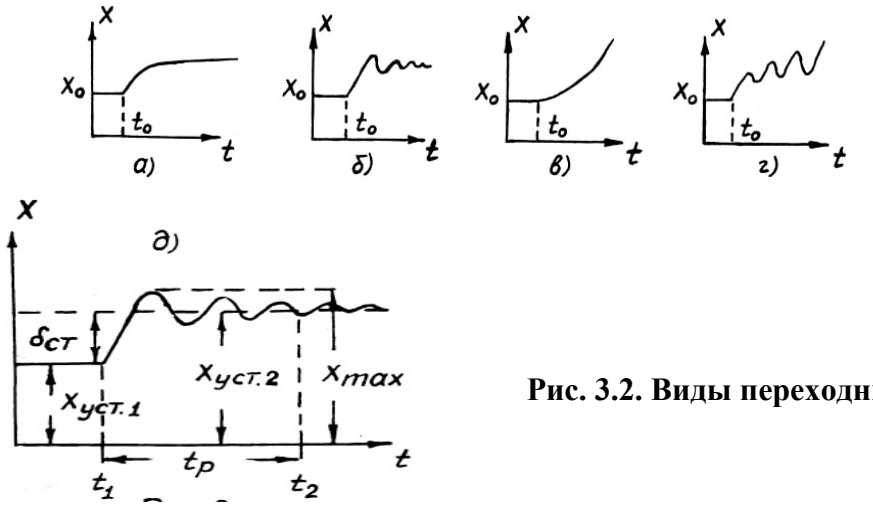



**Рис. 3.2. Виды переходных процессов**

Очевидно, что в САР не могут быть использованы системы с переходными процессами , изображенными на рис. 3.2в и 3.2г. В применении к САР переходные процессы характеризуются <u>показателями качества процесса регулирования [9, 10]</u>, важнейшими из которых являются: 1) <u>статическая ошибка</u> $\delta_{ст} = X_{уст.2} - X_{уст.1}$ – отклонение регулируемой величины от прежнего значения после окончания переходного процесса; 2) <u>перерегулирование (выброс)</u> $\Delta X_{\max} - X_{уст.2}$; 3) <u>время регулирования</u> $t_p$ – продолжительность переходного процесса; обычно последний считается законченным, если $|\Delta X| \le 0{,}05\ |X_{уст.2}|$ ; 4) <u>число колебаний регулируемой величины</u> в течение времени регулирования $t_p$. Основные требования, которые предъявляются к САР, заключаются в том, чтобы она была устойчивой и обеспечивала заданное качество процесса регулирования.

В большинстве случаев САР должна обладать следующими основными свойствами:

1) образовывать замкнутую цепь, так называемый контур регулирования;

2) передавать регулирующее воздействие вдоль контура в одном определенном направлении; при этом объект регулирования в случае отклонения регулируемой величины $X$ от заданного значения подает сигнал на регулятор, который через исполнительный элемент оказывает регулирующее воздействие $Y$ на объект;

3) регулирующее воздействие на объект должно вызывать изменение регулируемой величины, противоположное по знаку изменению, вызванному данным возмущающим воздействием.

Между последующими и предыдущими звеньями САР может существовать обратная связь. Она оказывает корректирующее воздействие на регулятор и на переходный процесс. Если сигнал, подаваемый по обратной связи на вход звена САР, складывается с основным сигналом, то обратная связь называется положительной. Если же он вычитается из основного сигнала – то отрицательной. Наибольшее распространение в САР и САУ получили отрицательные обратные связи, т.к. они повышают устойчивость системы [9].

По характеру изменения регулируемой величины различают системы автоматической стабилизации, программные, следящие, экстремальные и др. [2,3,9]. В системах автоматической стабилизации регулятор поддерживает регулируемую величину на постоянном уровне. Такие системы широко используются в производстве строительных материалов [8].

В системах программного регулирования регулируемая величина изменяется в соответствии с заранее заданной функцией времени. Программное регулирование применяется, например, в производстве керамических и железобетонных изделий [8,9]. В отличие от систем автоматической стабилизации, где оператор устанавливает задатчик в определенном положении, здесь задатчик перемещается специальным устройством с кулачком. Профиль кулачка выполняют так, чтобы регулируемая величина заданным образом изменялась во времени.

Другие виды САР также находят применение в промышленном производстве [8,9].

### 3.3. Основные свойства объектов регулирования

На процесс регулирования оказывают влияние как свойства регулятора, так и свойства объекта регулирования [9, 10]. Часто в самом объекте заложены свойства, положительно или отрицательно влияющие на характер процесса регулирования.

Основными свойствами объектов регулирования являются: 1) емкость объекта; 2) самовыравнивание; 3) время разгона и скорость разгона объекта; 4) запаздывание.

Емкостью объекта регулирования называется запас накопленной им энергии или вещества. Величина емкости зависит от размеров объекта. При большей емкости объекта регулирование протекает более устойчиво, так как регулируемая величина не может совершать чрезмерно быстрых изменений при нарушении баланса между притоком и расходом рабочей среды. Влияние емкости объекта на скорость изменения регулируемой ве-

личины определяется коэффициентом емкости – количеством энергии (или вещества), которое необходимо подвести к объекту, чтобы изменить значение регулируемой величины на единицу измерения.

Самовыравниванием называется свойство регулируемого объекта после нарушения равновесия между притоком и расходом вернуться к состоянию равновесия самостоятельно, без участия человека или регулятора. Рассмотрим пример (рис. 3.3).

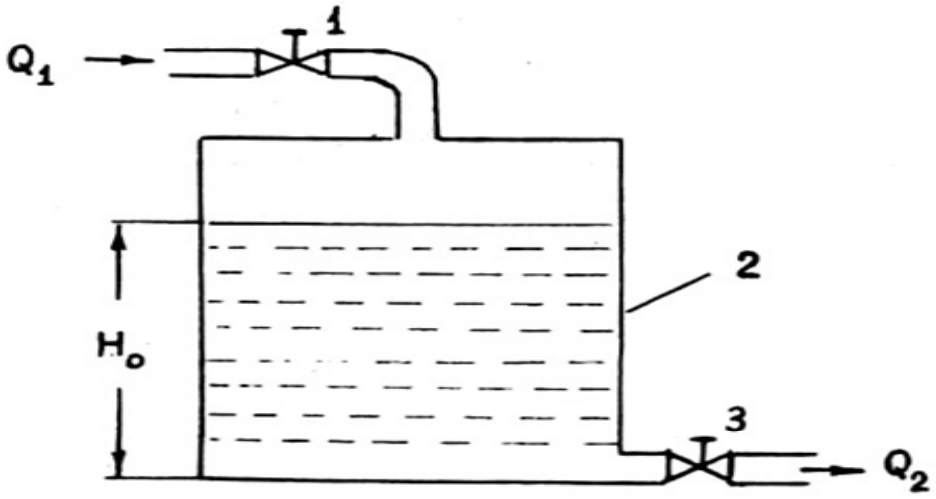



**Рис. 3.3**

Через вентиль 1 в бак 2 поступает вода с величиной притока $Q_1$; из бака вода вытекает через вентиль 3. Пусть расход воды $Q_2$ равен притоку: $Q_2 = Q_1$. Если увеличить открытие вентиля 1, то приток воды увеличится, баланс нарушится, и уровень воды начнет повышаться, что вызовет увеличение расхода $Q_2$ до значения $Q_1$ (вследствие увеличения гидростатического напора). Таким образом, данный объект обладает самовыравниванием. Если же вместо вентиля 3 установить насос с постоянной производительностью $Q_2$, то объект не будет обладать самовыравниванием.Таким образом, объекты автоматического регулирования можно классифицировать на устойчивые, обладающие самовыравниванием (называемые также статическими), нейтральные, не обладающие самовыравниванием (астатические объекты) и неустойчивые, с отрицательным самовыравниванием, в которых отклонение регулируемой величины приводит к увеличению отклонения. Самовыравнивание способствует более быстрой стабилизации регулируемой величины, т.е. облегчает работу регулятора. Отрицательное самовыравнивание значительно снижает качество регулирования [9].

Время разгона является характеристикой емкости объекта. У объектов с самовыравниванием при скачкообразном изменении подачи или потребления регулируемая величина изменяется, приближаясь к некоторому предельному значению. Промежуток времени, который требуется для дос-

тижения этого предельного значения при сохраняющейся начальной скорости изменения, называется временем разгона. Скоростью разгона объекта называется величина, обратная времени разгона.

В САР изменение регулируемой величины запаздывает относительно воздействия, оказываемого регулятором. Чем больше время запаздывания, тем труднее регулировать процесс. Большое запаздывание может сделать регулирование вообще невозможным. В промышленном производстве наибольшим запаздыванием обладают объекты, в которых регулируется температура, а наименьшим – объекты, в которых регулируется расход жидкости или газа [9, 10].

### 3.4. Математическое описание САР. Преобразование Лапласа

САР и их составные части в динамическом режиме описываются, в основном, дифференциальными уравнениями.

Для облегчения анализа работы САР широко используется операционный метод Лапласа, который позволяет операции дифференцирования и интегрирования по времени заменить операциями умножения и деления на комплексную переменную, а дифференциальные уравнения – свести к алгебраическим [9, 10].

Преобразование Лапласа применяется к широкому классу функций, удовлетворяющих следующим условиям:

1) $|f(t)| \le |M| \cdot exp(s_0 t)$, $t \ge 0$; $M$ и $s_0$ – постоянные;
2) $f(t) = 0$, $t < 0$

и задается в виде:

$$F(p) = \int_0^\infty e^{-pt} f(t)dt \ , \qquad (3.4.1а)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{a-j\infty}^{a+j\infty} e^{pt} F(p)dp \ , Rep = a > s_0 \ . \qquad (3.4.1б)$$

Здесь $p$ – комплексная переменная, $j$ – мнимая единица. Функция $f(t)$ называется оригиналом, $F(p)$ – ее изображением по Лапласу, их взаимное соответствие друг другу записывается в виде: $f(t) \div F(p)$. Например, если $f(t) = 1$, то $F(p) = 1/p$; если $f(t) = \exp(p_0 t)$, то $F(p) = 1/(p - p_0)$. Далее, если $f(t) \div F(p)$, то

$$f'(t) \div pF(p) - f(0), \qquad (3.4.2)$$

$$f^{(n)}(t) \div p^n F(p) - p^{n-1} f(0) - p^{n-2} f'(0) - f^{(n-1)}(0), \qquad (3.4.3)$$

$$\int_0^t f(t)dt \div \frac{F(p)}{p} . \qquad (3.4.4)$$

Соотношения (3.4.2, 3.4.3) легко доказываются интегрированием по частям.

## 3.5. Динамические звенья и их характеристики

САР часто представляют в виде комбинации динамических звеньев, описываемых передаточными функциями. Передаточной функцией $W(p)$ звена называется отношение изображения по Лапласу переменной $y(t)$, полученной на выходе звена, к изображению переменной $x(t)$, поданной на вход звена, при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}. \qquad (3.5.1)$$

Условно звено изображают в виде прямоугольника, вход и выход которого отмечают стрелками (рис. 3.4).

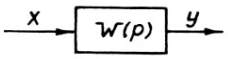



**Рис. 3.4**

Каждому звену соответствует своя, вполне определенная передаточная функция $W(p)$.

Динамические свойства типовых звеньев и САР могут быть не только описаны уравнениями, но и отображены графически временными (переходной и импульсной) и частотными характеристиками. Эти характеристики могут быть построены по известному уравнению звена или сняты экспериментально. И наоборот, по известным характеристикам можно получить уравнение, описывающее динамические свойства звена.

<u>Переходной характеристикой</u> $y = h(t)$ описывается изменение во времени выходной величины звена, обусловленное подачей на его вход единичного ступенчатого воздействия (единичного скачка):

$$x(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ 1, t \geq 0 \end{cases} \qquad (3.5.2)$$

Единичный скачок является распространенным на практике (мгновенный сброс или приложение нагрузки, скачок температуры и т.д.) и наиболее неблагоприятным. По виду переходной характеристики *h(t)* можно судить о динамических свойствах системы. Применяя преобразование Лапласа, получаем:

$$x(p) = \int_0^\infty e^{-pt} \cdot 1 \cdot dt = 1/p, \;\; h(p) = \frac{W(p)}{p}, \;\; h(t) \div \frac{W(p)}{p}.$$

Таким образом, зная передаточную функцию системы, легко определить ее реакцию на единичный скачок. Для этого следует воспользоваться

таблицами обратных преобразований Лапласа и отыскать в них функцию времени, соответствующую изображению $W(p)/p$.

В теории автоматического регулирования применяются также импульсные характеристики $y = g(t)$, представляющие собой реакцию звена на единичный импульс. Математически единичный импульс описывается с помощью δ-функции Дирака:

$$\delta(t) = 0,\ t \neq 0,\ \delta(0) = \infty,\ t = 0;\ \int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t)dt = 1,\ \int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t)f(t)dt = f(0), \qquad (3.5.3)$$

где $f(t)$– произвольная непрерывная функция. Используя преобразование Лапласа, получаем:

$$x(p) = \int_{0}^{\infty} e^{-pt}\delta(t)dt = 1,\ g(p) = W(p),\ g(t) = h'(t)\ . \qquad (3.5.4)$$

Для описания установившихся вынужденных колебаний на выходе звена, вызванных гармоническим воздействием на входе, применяются частотные характеристики (ЧХ). На практике для получения ЧХ вместо гармонических используют прямоугольные, трапецеидальные, треугольные формы импульсов. Однако, при этом рассматривается разложение входного воздействия а ряд Фурье и анализируется реакция на гармонические составляющие этого разложения.

Если на вход звена подать гармоническое воздействие

$$x(t) = x_m(\omega)\sin\omega t \qquad (3.5.5)$$

то по окончании переходного процесса на выходе звена установятся гармонические колебания

$$y(t) = y_m(\omega)\sin(\omega t + \varphi(\omega)) \qquad (3.5.6)$$

где $\varphi -$ фазовый сдвиг между входными и выходными колебаниями. Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) звена называется функция $A(\omega)$, задаваемая соотношением: $A(\omega) = y_m(\omega)/x_m(\omega)$. Зависимость $\varphi = \varphi(\omega)$ называется фазовой частотной характеристикой (ФЧХ).

Объединением АЧХ (рис. 3. 6а) и ФЧХ (рис. 3.6б) в одну, получается амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) (рис. 3.6в), у которой полярными координатами являются $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

Аналитические выражения для ЧХ получаются по известной передаточной функции звена подстановкой $p = j\omega$. Получающаяся при этом комплексная величина $W(j\omega)$ как раз и является АФЧХ. Она записывается в виде:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = u(\omega) + jv(\omega), \qquad (3.5.7)$$

где функции $u(\omega)$ и $v(\omega)$ называются действительной и мнимой частотными характеристиками, соответственно. Отсюда следует, что

$$A(\omega)=\sqrt{u^2(\omega)+v^2(\omega)}\,,\ \varphi(\omega)=arctg\left[v(\omega)/u(\omega)\right]\,, \qquad (3.5.8)$$

$$u(\omega)=A(\omega)\cos\varphi(\omega)\,,\ v(\omega)=A(\omega)\sin\varphi(\omega)\ . \qquad (3.5.9)$$

Приведенные соотношения имеют смысл для произвольной совокупности звеньев, образующей линейную систему, т.е. систему, описывающуюся линейными дифференциальными уравнениями. Частотные характеристики позволяют исследовать устойчивость САР и характер протекания переходных процессов. По известной величине $W(j\omega)$ можно изучать реакцию системы на любое входное воздействие.

## 3.6. Типовые динамические звенья

Рассмотрим аналитическое описание и графическое изображение динамических свойств наиболее часто встречающихся, так называемых типовых динамических звеньев.

Их всего шесть.

Безинерционное (идеальное, или пропорциональное) звено является наиболее простым. Его выходная величина пропорциональна входной:

$$y(t)=k\cdot x(t)\,. \qquad (3.6.1)$$

Это звено без искажений пропускает все сигналы (что является известной идеализацией). Очевидно, что для такого звена

$$W(p)=k\,,\ W(j\omega)=k\,,\ h(t)=k\,.$$

Хорошими приближениями к идеальному звену являются: делитель напряжения, механический редуктор, сельсины, жесткий рычаг и т.д. К такому звену могут быть приведены, например, апериодическое или колебательное звенья, если пренебречь в них влиянием переходных процессов.

Инерционное, или апериодическое звено первого порядка является наиболее распространенным в САР. Оно обладает свойством накапливать энергию и описывается уравнением:

$$y+T\frac{dy}{dt}=k\cdot x(t)\,. \qquad (3.6.2)$$

Для него

$$W(p)=\frac{k}{1+pT}\ ,\ W(j\omega)=\frac{k}{1+j\omega T}\ ,\ h(t)=k\cdot(1-e^{-t/T})\,, \qquad (3.6.3)$$

где $k$ – статический коэффициент усиления, $T$ – постоянная времени (чем больше $T$, тем длительнее переходный процесс).

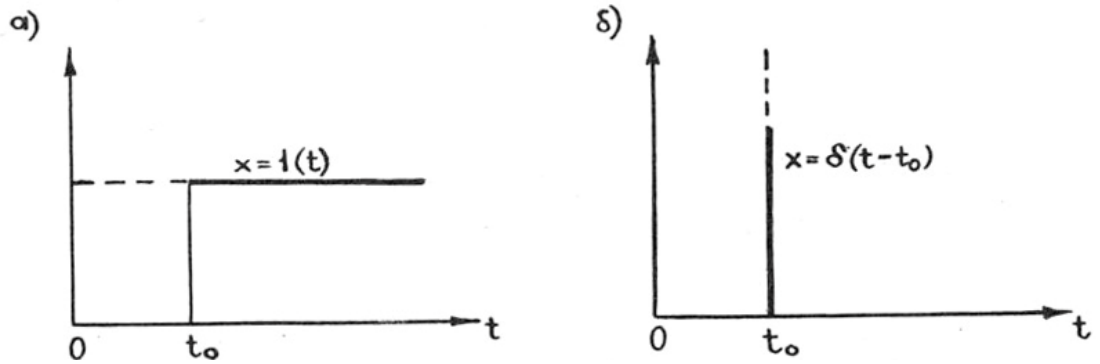



**Рис. 3.5**

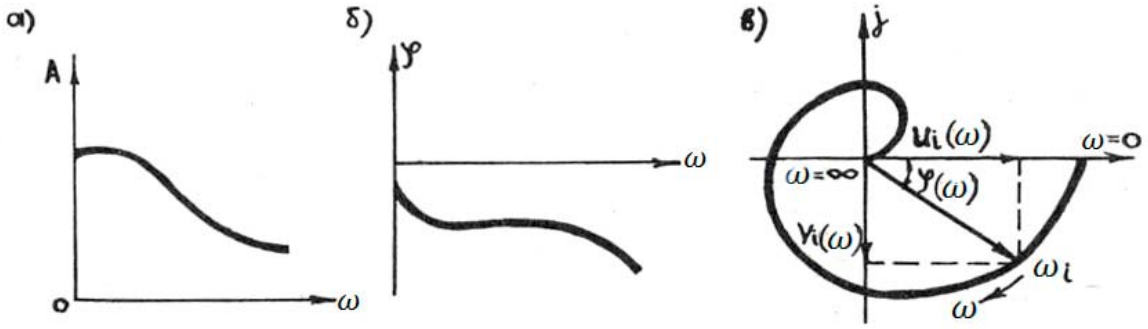



**Рис. 3.6**

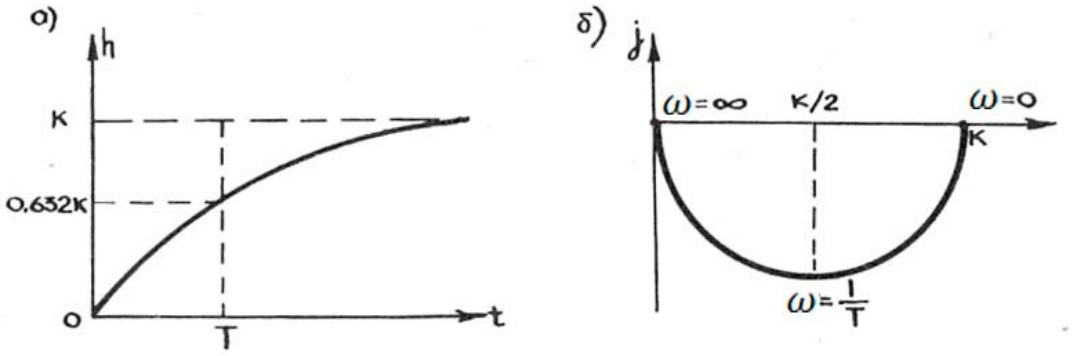



**Рис. 3.7**

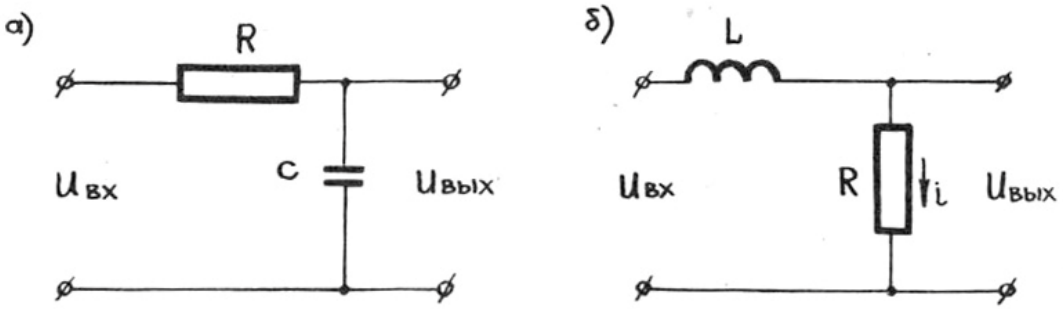



**Рис. 3.8**

Если переходная характеристика $h(t)$ получена экспериментально, то по ней можно определить значения параметров $k$ и $T$ (рис. 3.7). АФЧХ инерционного звена представляет собой полуокружность радиуса $k/2$ с центром в т. ($k/2$, 0). Она показывает, что коэффициент усиления в режиме

установившихся колебаний всегда меньше статического ($k$) и падает с увеличением $\omega$ и $T$.

Инерционное звено хорошо пропускает колебания на низких частотах и плохо – на высоких. Количественно это оценивается полосой пропускания частот: $0 \le \omega \le 1/T$, для которой $A(\omega) \ge 0{,}707A(0)$.

Примерами инерционных звеньев являются: термопара ($x$ – температура среды, $y$ – термоЭДС) и другие измерительные преобразователи. К ним относится также генератор постоянного тока с независимым возбуждением ($x = U_{возб}$, $y = U_{як}$), а также некоторые пассивные четырехполюсники (рис. 8). Для четырехполюсника с емкостью (рис. 8а), получаем, например,

$$W(p) = U_{вых}(p)/U_{вх}(p) = 1/(1+pT), \quad T = RC.$$

<u>Реальное дифференцирующее</u> звено описывается уравнением:

$$y + T\frac{dy}{dt} = k \cdot \frac{dx}{dt} \qquad (3.6.4)$$

$$W(p) = \frac{kp}{1+pT}, \; W(j\omega) = \frac{k\omega^2 T + jk\omega}{1+\omega^2 T^2}, \; h(t) = \frac{k}{T}e^{-t/T}. \qquad (3.6.5)$$

(рис. 3.9). При $T \to 0$ получается <u>идеальное дифференцирующее</u> звено, которое при подаче на вход единичного скачка дает мгновенный импульс (рис. 3.10). Реальное дифференцирующее звено можно представить в виде последовательно соединенных идеального дифференцирующего и инерционного звеньев.

Хорошим приближением к дифференцирующему звену являются: тахогенератор переменного тока ($x$ – угол поворота ротора, $y$ – ЭДС якоря). Примерами дифференцирующих звеньев являются также четырехполюсники, изображенные на рис. 3.11. Так, для схемы на рис. 3.11а получаем:

$$x \equiv U_{вх} = RI + \frac{1}{C}\int Idt, \; y \equiv U_{вых} = RI, \; W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{Tp}{1+Tp},$$

где $T = RC$ – постоянная времени.

<u>Идеальное интегрирующее</u> звено определяется уравнением

$$\frac{dy}{dt} = k \cdot x(t), \text{ или } y(t) = k \cdot \int x(t)dt. \qquad (3.6.6)$$

Характеристики его имеют следующий вид (рис. 3.12):

$$W(p) = \frac{k}{p}, \; W(j\omega) = \frac{k}{j\omega}, \; h(t) = k \cdot t. \qquad (3.6.7)$$

Приближениями к идеальному интегрирующему звену являются гидравлический демпфер ($x$ – действующая на поршень сила, $y$ – переме-

щение поршня), двигатель постоянного тока с независимым возбуждением ($x = U_{як}$, $y$ – угол поворота вала), конденсатор ($U = \int I(t)dt / C$), идеальный дроссель ($I(t) = \int U(t)dt / L$).

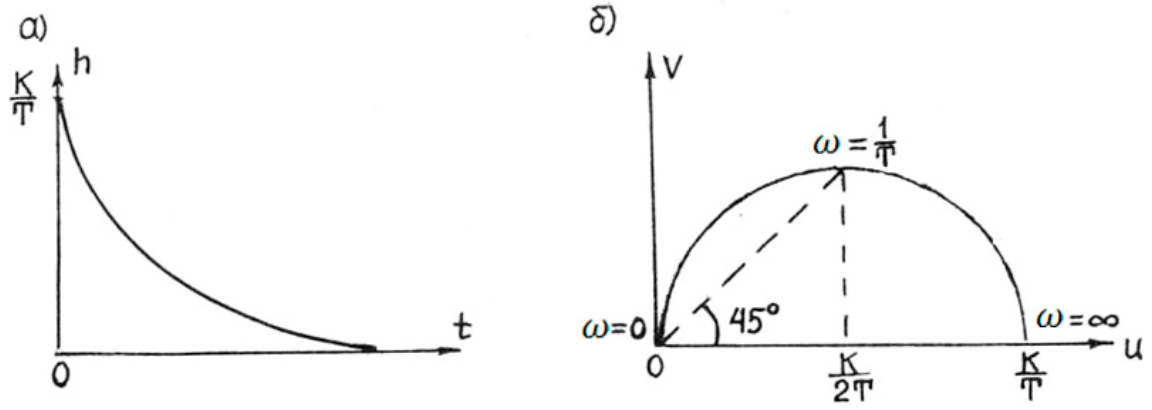



**Рис. 3.9**

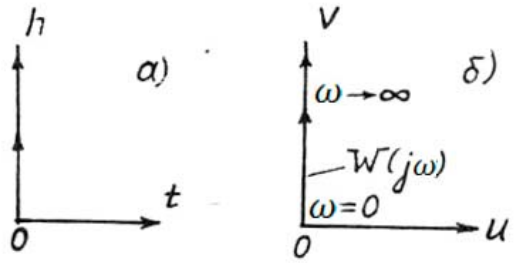



**Рис. 3.10**

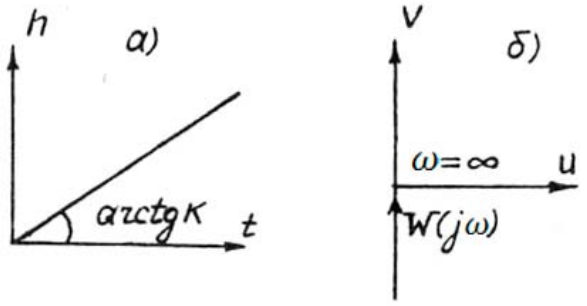



**Рис. 3.12**

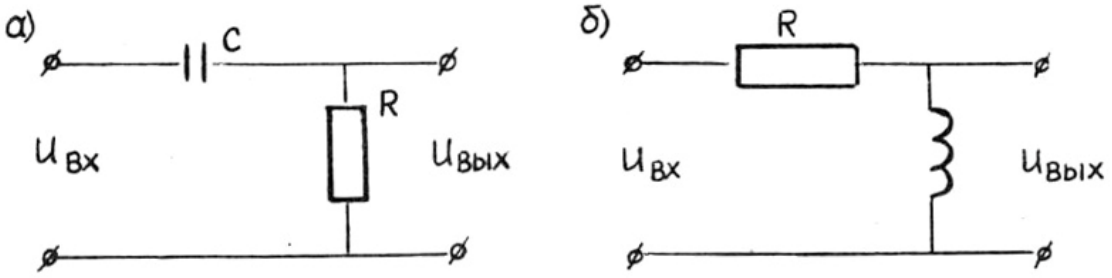



**Рис. 3.11**

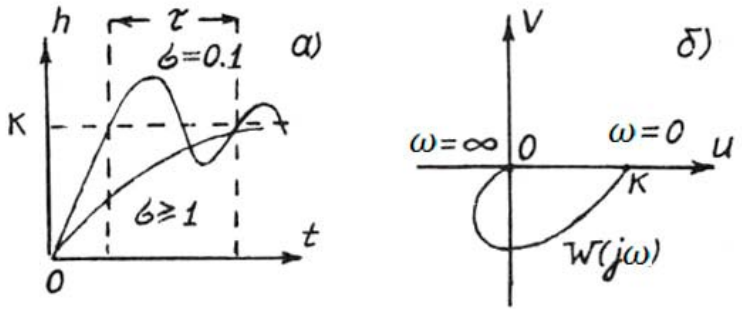



**Рис. 3.13**

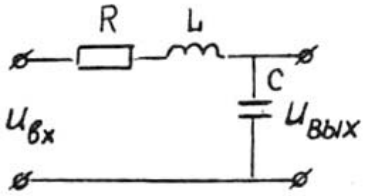



**Рис. 3.14**

Реальные интегрирующие звенья обладают инерционностью и описываются уравнениями:

$$T\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{dy}{dt}=k\cdot x(t), \qquad (3.6.8)$$

$$W(p)=\frac{k}{p(1+Tp)}\ ,\ h(t)=k[t-T(1-e^{-t/T})]. \qquad (3.6.9)$$

Примерами таких звеньев являются демпфер и серводвигатель, если более точно рассматривать их уравнения движения. Они могут быть представлены последовательно соединенными интегрирующим и инерционным звеньями.

Колебательное звено описывается уравнением

$$T^2\frac{d^2y}{dt^2}+2\sigma T\frac{dy}{dt}+y=k\cdot x(t), \qquad (3.6.10)$$

где $T$ – постоянная времени; $\sigma$ – коэффициент затухания ($\sigma$ < 1). Передаточная функция и АФЧХ имеют вид:

$$W(p)=\frac{k}{T^2p^2+2\sigma Tp+1}\ ,\ W(j\omega)=\frac{k}{(1-T^2\omega^2)+2j\sigma T\omega}\ . \qquad (3.6.11)$$

Переходная характеристика (рис. 13) дается выражением:

$$h(t)=k[1+\frac{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}{\beta}e^{\alpha t}\cdot\sin(\beta t+arctg\frac{\beta}{\alpha})]\ , \qquad (3.6.12)$$

где $\alpha=-\sigma/T$; $\beta=2\sqrt{1-\sigma^2}/T$.

С ростом $\sigma$ колебательность переходного процесса уменьшается, исчезая при $\sigma\geq 1$. При $\sigma\geq 1$ звено превращается в инерционное апериодическое второго порядка и может быть представлено двумя последовательно соединенными инерционными звеньями первого порядка.

Примерами колебательных звеньев могут служить электрический колебательный контур (рис. 14) и механические устройства, обладающие упругостью и вязким трением. Для колебательного контура можно записать:

$$u_{вх}(t)=i(t)\cdot R+Ldi/dt+\int i(t)dt/C,\ u_{вых}(t)=\int i(t)dt/C,$$

$$U_{вх}(p)=I(p)\cdot R+Lp\cdot I(p)+I(p)/(Cp),\ U_{вых}(p)=I(p)/(Cp),$$

$$W(p)=\frac{1}{RCp+LCp^2+1}=\frac{1}{T^2p^2+2\sigma Tp+1}\ ,$$

где $T^2=LC,\ 2\sigma T=RC$.

Звено запаздывания характеризуется уравнением

$$y(t)=x(t-\tau), \qquad (3.6.13)$$

т.е. оно "задерживает" входной сигнал на интервал времени $\tau$. Отсюда следует, что

$$Y(p)=\int_0^\infty e^{-pt}y(t)dt=\int_0^\infty e^{-pt}x(t-\tau)dt=e^{-p\tau}\int_{-\tau}^\infty e^{-ps}x(s)ds=\ e^{-p\tau}X(p),$$

$$W(p)=e^{-p\tau}. \qquad (3.6.14)$$

## 3.7. Схематическое представление САР

При графическом изображении САР применяют функциональные и структурные схемы.

Функциональной схемой называется такая схема, в которой каждой функциональной операции в системе соответствует определенное звено. Функциональные схемы легко воспринимаются визуально и являются наиболее доступными для понимания без специальной подготовки. Поэтому они находят широкое применение при изучении многих технических дисциплин.

Изображение системы регулирования в виде совокупности типовых звеньев, каждым из которых выполняется определенная математическая операция, с указанием связей между звеньями, носит название структурной схемы. Структурная схема может быть составлена на основе известных уравнений системы и наоборот, по известной структурной схеме могут быть получены уравнения САР.

Рассмотрим простейшие сочетания типовых звеньев, из которых образуются структурные схемы, и определим для них передаточные функции. При последовательном соединении звеньев (рис. 3.15) имеем:

$$X_1(p)=W_1(p)X(p),\ X_2(p)=W_2(p)X_1(p),\ \dots,\ Y(p)=W_n(p)X_{n-1}(p).$$

Исключая здесь промежуточные переменные, получаем:

$$Y(p)=W_1(p)W_2(p)...W_n(p)X(p)=W(p)X(p),$$

где

$$W(p)=\prod W_i(p). \qquad (3.7.1)$$

Следовательно, передаточная функция цепочки последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев Это означает, что такую цепочку в структурной схеме можно заменить одним эквивалентным звеном с передаточной функцией $W(p)$.

Параллельное соединение звеньев. Если входная величина $x(t)$ является общей для всех звеньев, а выходная $y(t)$ формируется как сумма выходных величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, … , $y_n(t)$ всех звеньев, то такое соединение звеньев называется параллельным (рис. 3.16). В этом случае

$$Y_1(p)=W_1(p)X(p),\ Y_2(p)=W_2(p)X(p),\ \dots,\ Y_n(p)=W_n(p)X(p),$$

$$Y(p)=\sum_{i=1}^n Y_i(p)=\sum_{i=1}^n W_i(p)X(p)=W(p)X(p), \quad (3.7.2)$$

т.е. $$W(p)=\sum_{i=1}^{n}W_i(p)\,. \qquad (3.7.3)$$

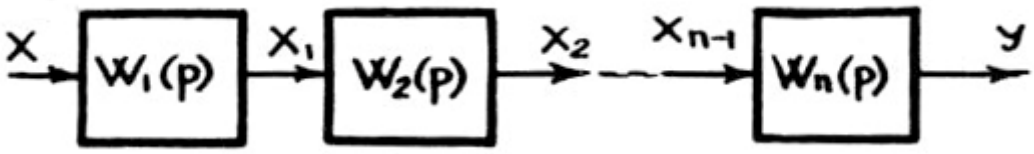



**Рис. 3.15**

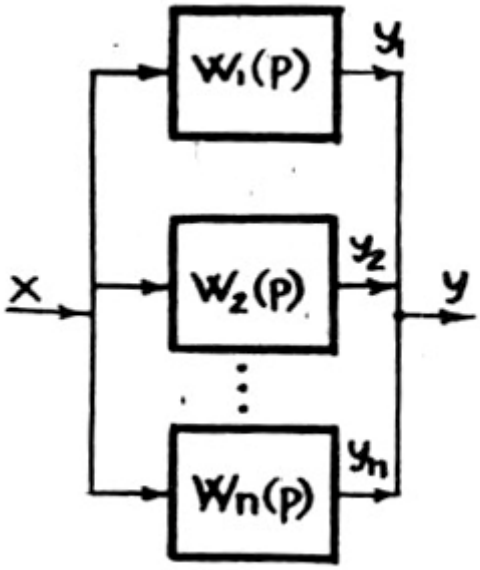



**Рис. 3.16**

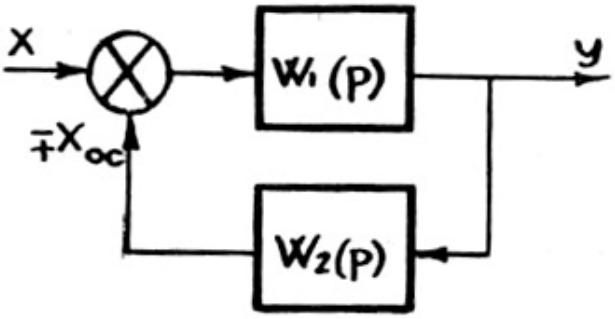



**Рис. 3.17**

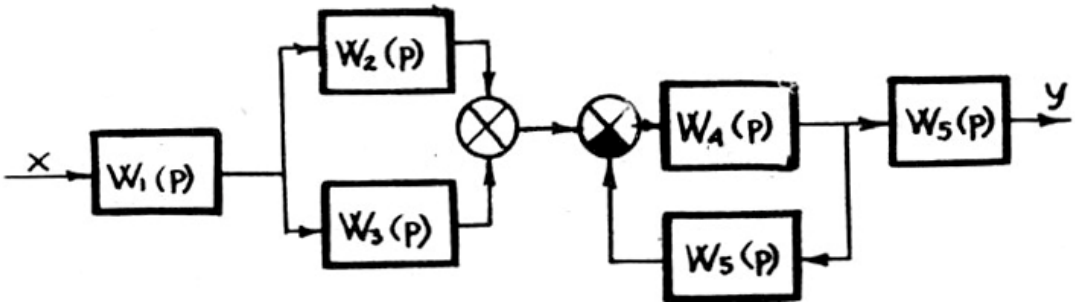



**Рис. 3.18**

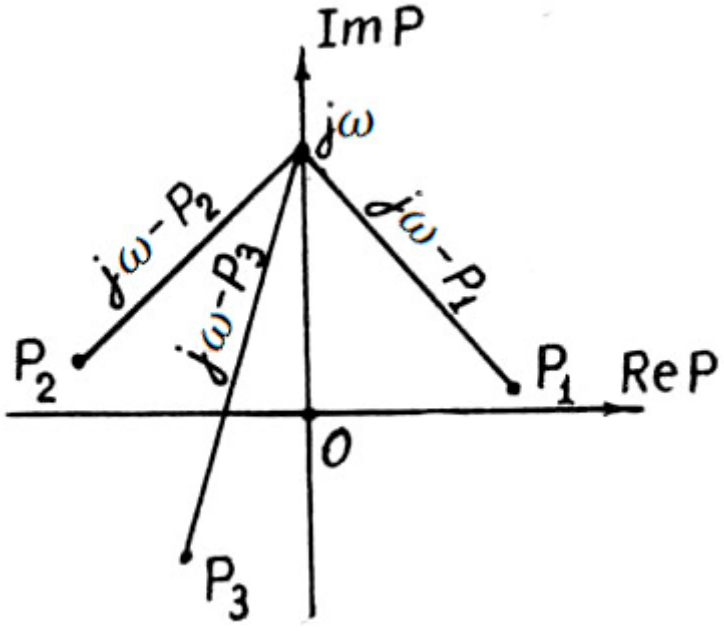



**Рис. 3.19**

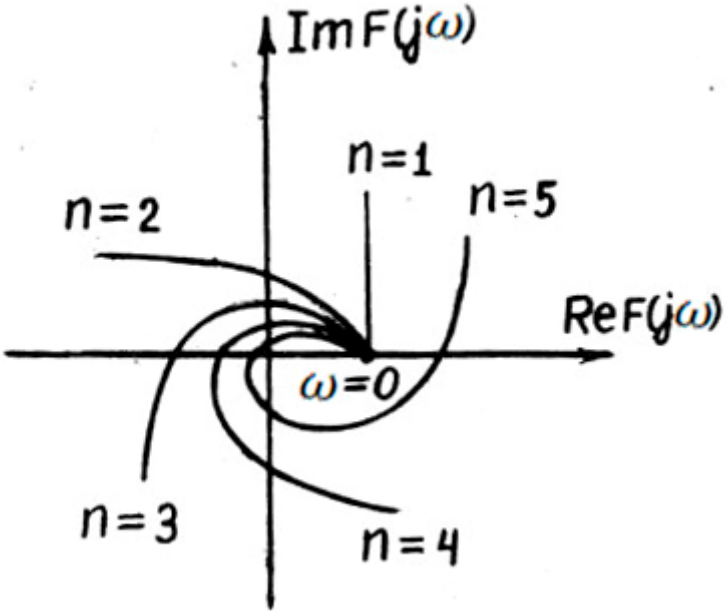



**Рис. 3.20**

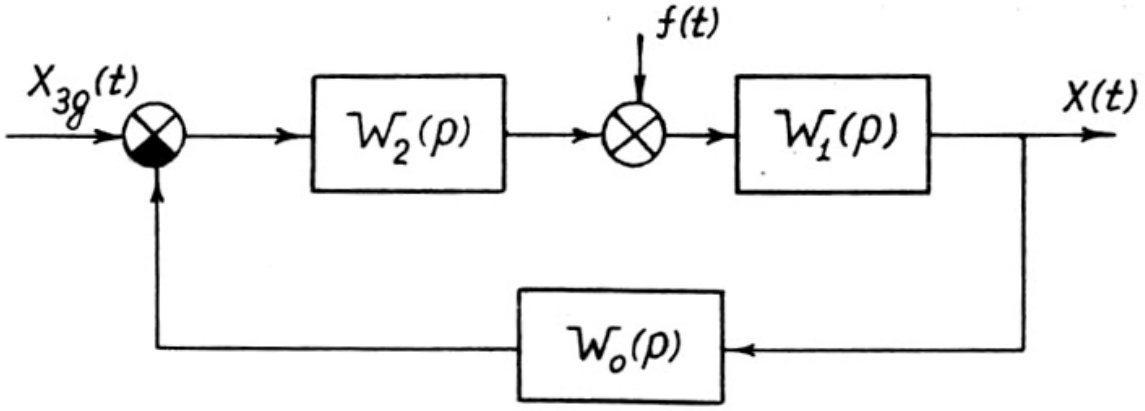



**Рис. 3.21**

Следовательно, передаточная функция группы параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев.

Звено, охваченное обратной связью. Пусть некоторое звено с передаточной функцией $W_1(p)$ охвачено обратной связью (рис. 3.17), т.е. к выходу этого звена присоединено звено с передаточной функцией $W_2(p)$, выход которого подается на вход рассматриваемого звена с положительным или отрицательным знаком.

В общем случае звено с обратной связью описывается системой уравнений:

$$Y(p) = W1(p)(X(p) \mp X_{oc}(p)),\ X_{oc}(p) = W_2(p)Y(p)\ . \qquad (3.7.4)$$

Исключая отсюда $X_{oc}(p)$, получаем:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_2(p)}\ . \qquad (3.7.5)$$

На рис. 3.18 в качестве примера приведена структурная схема разомкнутой системы регулирования, передаточная функция которой дается выражением: $W(p) = W_1(p)[W_2(p) + W_3(p)]W_4(p)W_6(p)/(1 + W_4(p)W_5(p))$.

## 3.8. Устойчивость систем автоматического регулирования

При оценке свойств САР прежде всего выясняют ее устойчивость. Понятие устойчивости САР, как и всякой динамической системы, связано с ее поведением после прекращения внешнего воздействия, т.е. с ее свободным движением под влиянием начальных условий.

Как известно, дифференциальное уравнение линейной или линеаризованной стационарной САР может быть записано в виде:

$$(a_0 \frac{d^n}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + ... + a_n)x(t) = (b_0 \frac{d^m}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} + ... + b_m)x_{зд}(t) +$$

$$+ (c_0 \frac{d^l}{dt^l} + c_1 \frac{d^{l-1}}{dt^{l-1}} + ... + c_{l-1} \frac{d}{dt} + c_l) f(t), \qquad (3.8.1)$$

где $x(t)$, $x_{зд}(t)$, и $f(t)$ – соответственно, регулируемая величина, задающее воздействие и возмущение, или отклонения этих величин от их базисных значений. Величины $a_0$, $a_1$, … , $a_n$, $b_0$, $b_1$, … , $b_m$, $c_0$, $c_1$, … , $c_l$ – это постоянные коэффициенты; при этом $m \le n$, $l \le n$ [9, 10].

Для оценки устойчивости системы должна быть исследована свободная составляющая решения уравнения (3.8.1), т.е. решение однородного уравнения

$$(a_0 \frac{d^n}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + ... + a_{n-1} \frac{d}{dt} + a_n)x(t) = 0 \qquad (3.8.2)$$

при начальных условиях

$$x(0) = x^0,\ \dot{x}(0) = \dot{x}^0\ , \dots ,\ x^{(n-1)}(0) = x^{(n-1)0}. \qquad (3.8.3)$$

В наиболее благоприятном случае свободная составляющая $x_{св}$ регулируемой величины, создаваемая начальными условиями, с течением времени стремится к нулю. Такую систему называют устойчивой (асимптотически устойчивой).

Возможно также, что $x_{св}$ стремится к некоторому конечному значению или совершает гармонические колебания, амплитуда которых стремится к конечному значению. Такие системы называют нейтральными (нейтрально устойчивыми).

Если же $x_{св}$ неограниченно возрастает или совершает колебания с неограниченно возрастающей амплитудой, то система является неустойчивой.

## Характеристическое уравнение системы

Общее решение уравнения (3.8.2) представляется суммой слагаемых, вид которых определяется значениями корней характеристического уравнения

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_{n-1} p + a_n = 0. \qquad (3.8.4)$$

Таким образом, об устойчивости САР можно судить по корням ее характеристического уравнения: необходимым и достаточным условием устойчивости является отрицательность действительных частей всех корней

характеристического уравнения. До появления ЭВМ вычислять корни алгебраических уравнений порядка выше четвертого было затруднительно, поэтому были разработаны различные критерии устойчивости, т.е. признаки, по которым можно судить об устойчивости, не решая характеристического уравнения системы, а располагая только его коэффициентами.

Для определения устойчивости САР наиболее часто используются алгебраические критерии Рауса и Гурвица, а также частотные критерии Найквиста и Михайлова.

Рассмотрим формулировку критериев Гурвица и Михайлова.

## Критерий устойчивости Гурвица

Критерий Гурвица формулируется следующим образом. САР устойчива, если $a_0 > 0$ и главные миноры матрицы $A$ Гурвица положительны, т.е. $a_1 > 0$,

$$A=\begin{pmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & a_{n-1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & a_{n-2} & a_n \end{pmatrix}; \quad \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \text{ и т.д.}$$

Пример 1. Определить устойчивость САР, характеристическое уравнение которой имеет вид: $p^3 + 2p^2 + 8p + 5 = 0$.

Решение. Матрица $A$ записывается в виде: $; A = \begin{pmatrix} 2 & 5 & 0 \\ 1 & 8 & 0 \\ 0 & 2 & 5 \end{pmatrix}; a_0 = 1, a_1 = 2;$

$$\begin{vmatrix} 2 & 5 \\ 1 & 8 \end{vmatrix} = 11 > 0; \begin{vmatrix} 2 & 5 & 0 \\ 1 & 8 & 0 \\ 0 & 2 & 5 \end{vmatrix} = 55 > 0.$$

Вывод: САР устойчива.

Пример 2. Найти условия устойчивости состояний равновесия динамических систем, заданных следующими характеристическими уравнениями:

1) $ap + b = 0$; $(a/b > 0)$;

2) $p^2 + ap + b = 0$; $(a > 0,\ b > 0)$;

3) $p^3 + ap^2 + bp + 1 = 0$; $(ab > 1)$;

4) $p^4 + ap^3 + bp^2 + p + 1 = 0$; $(a > 0,\ ab > 1,\ a(b\text{-}a) > 1)$.

Алгебраические критерии удобны при n < 5. Для систем более высоких порядков необходимо использовать компьютеры или применять частотные критерии.

## Критерий устойчивости Михайлова

Критерий устойчивости Михайлова основан на исследовании левой части характеристического уравнения (3.8.4) линейной САР. На основании теоремы Безу левая часть уравнения может быть представлена в виде:

$$F(p) = a_0(p - p_1)(p - p_2)...(p - p_n), \qquad (3.8.5)$$

где $p_1, p_2, \ldots, p_n$ – корни последнего. Каждый из этих корней изображается вектором на комплексной плоскости переменной $p$. Если положить $p = j\omega$, то все сомножители типа $(j\omega - p_i)$ будут представляться векторами, оканчивающимися на мнимой оси (рис. 3.19). Модуль вектора $F(j\omega)$ будет равен произведению модулей векторов $(j\omega - p_i)$, а аргумент – равен сумме аргументов этих векторов (рис. 3.19).

При изменении частоты $\omega$ от $-\infty$ до $+\infty$ конец каждого вектора будет скользить по мнимой оси и повернется против часовой стрелки на угол $+\pi$, если корень $p_i$ лежит слева от мнимой оси, и на угол $-\pi$, если $p_i$ лежит справа от последней. Следовательно, если система устойчива (т.е. все корни – левые), то при изменении $\omega$ от $-\infty$ до $+\infty$ вектор $F(j\omega)$ повернется в положительном направлении на угол $+\pi n$.

Поскольку годограф вектора $F(j\omega)$ симметричен относительно вещественной оси, то можно ограничиться рассмотрением положительных частот $\omega$. При этом угол, описываемый вектором $F(j\omega)$ при изменении $\omega$ от 0 до $+\infty$, будет в два раза меньше, чем при изменении $\omega$ от $-\infty$ до $+\infty$. Поэтому часто критерий Михайлова формулируют следующим образом: для устойчивости линейной САР необходимо и достаточно, чтобы вектор $F(j\omega)$ при изменении $\omega$ от 0 до $+\infty$ повернулся, нигде не обращаясь в нуль, вокруг начала координат против часовой стрелки на угол $n\pi/2$, т.е. последовательно прошел $n$ квадрантов комплексной плоскости, где $n$ – порядок характеристического уравнения.

В качестве примера на рис. 20 приведены графики устойчивых САР.

Характеристические полиномы разомкнутой и замкнутой САР

Для расчетов обычно необходимы передаточные функции разомкнутой САР, а также передаточные функции замкнутой САР относительно задающего воздействия и относительно каждого из возмущений. Определим эти величины для одноконтурной САР (рис. 3.21).

Передаточная функция $W(p)$ разомкнутой САР есть отношение изображения $Y_0(p)$ сигнала обратной связи $y_0$ к изображению $x_{зд}(p)$ задающего воздействия $x_{зд}(t)$. При этом контур регулирования предполагают разомкнутым около элемента сравнения. Для рассматриваемой САР

$$W(p)=\frac{Y_0(p)}{X_{зд}(p)}=\frac{R(p)}{Q(p)},\ \ Q(p)Y_0(p)=R(p)X_{зд}(p)\ , \qquad (3.8.6)$$

где $R$ и $Q$ – полиномы от $p$. Отсюда следует, что характеристическим полиномом разомкнутой САР является знаменатель ее передаточной функции.

Передаточная функция $W_з(p)$ замкнутой САР относительно задающего воздействия есть отношение изображения $X(p)$ регулируемой величины $x(t)$ к изображению задающего воздействия. При этом рассматривается замкнутая система и предполагается, что других внешних воздействий нет. Для данной САР

$$W_з(p)=\frac{X(p)}{X_{зд}(p)}=\frac{W_1W_2}{1+W_0W_1W_2}\ ,\ \left(1+W(p)\right)X(p)=W_1W_2X_{зд}(p)\,. \quad (3.8.7)$$

Передаточная функция $W_f$ замкнутой САР относительно возмущения есть отношение изображения регулируемой величины к изображению $F(p)$ возмущения $f(t)$. При этом предполагают, что других внешних воздействий нет. Для рассматриваемой системы

$$W_f(p)=\frac{X(p)}{F(p)}=\frac{W_1}{1+W_0W_1W_2}\ ,\quad \left(1+W(p)\right)X(p)=W_1F(p)\ . \qquad (3.8.8)$$

Из последнего из уравнений (3.8.8) следует, что характеристическое уравнение замкнутой САР имеет вид:

$$1+W(p)=0,\ \text{или}\ \ 1+\frac{R(p)}{Q(p)}=0,\ \ Q(p)+R(p)=0\,. \qquad (3.8.9)$$

Таким образом, характеристический полином замкнутой САР получается сложением числителя и знаменателя передаточной функции разомкнутой САР.

## 3.9. Классификация автоматических регуляторов

Основным свойством регулятора является характеристика его действия, т.е. зависимость между изменением регулируемого параметра и пере-

мещением регулирующего органа. По характеристике действия регуляторы можно подразделить на шесть типов [9, 10]: 1) позиционные; 2) астатические (интегральные) И; 3) статические (пропорциональные) П; 4) изодромные (пропорционально-интегральные) ПИ; 5) пропорционально-дифференциальные (ПД); 6) пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД).

По способу действия регуляторы подразделяют на регуляторы прямого и непрямого действия.

Регуляторы прямого действия являются простейшими регулирующими механизмами. Они приводятся в действие усилием, развиваемым измерительной системой регулятора при изменении регулируемой величины. В большинстве случаев регулирующий орган приводится в действие системой рычагов или давлением жидкости или газа, заключенного в системе самого прибора.

В регуляторах непрямого действия усилие, возникающее в чувствительном элементе, при изменении регулируемой величины включает вспомогательное устройство – управляющий элемент. Это устройство открывает доступ энергии от постороннего источника (жидкость под давлением, сжатый воздух, электроэнергия) в механизм, развивающий усилие, необходимое для перестановки регулирующего органа. Чувствительность таких регуляторов выше, чем у регуляторов прямого действия.

По виду используемой энергии регуляторы подразделяют на пневматические, гидравлические, электрические и комбинированные. По характеру воздействия на регулирующий орган – на регуляторы непрерывного и прерывистого действия. По виду регулируемой величины – на регуляторы температуры, давления, расхода, уровня и т.д.

Позиционные регуляторы. У позиционных регуляторов регулирующий орган может занимать два или три определенных положения. Примером позиционного электрического регулятора является поплавковое реле уровня, регулирующее уровень жидкости в расходном баке (рис. 3.22). Поплавок 1 прикреплен к переключателю 2. При опускании поплавка вместе с уровнем жидкости закрепленный на поплавке переключатель упирается в контакт $К_1$, который через магнитный пускатель 3 включает электродвигатель 4 насоса 5. Насос начинает подавать жидкость в бак, и уровень ее повышается до тех пор, пока переключатель 2 не перейдет в положение $К_2$. При этом контакт $К_2$ замкнется, и двигатель остановится. По мере расхода жидкости из бака ее уровень будет понижаться, пока переключатель 2 снова не замкнет контакт $К_1$ и не включит насос. Такой регулятор поддерживает уровень жидкости в пределах от $Н_1$ до $Н_2$. Частота включения и отключения двигателя зависит от расхода жидкости, производительности насоса и установленной разности $Н_2 – Н_1$. При позиционном регулировании

параметр все время меняется от минимального до максимального значения, что является недостатком этого метода регулирования.

Для позиционного регулирования технологических параметров используют также электронные автоматические приборы (мосты, потенциометры и т.п.) с встроенными в них контактными устройствами, позволяющими осуществлять двух- или трехпозиционное регулирование. В схеме позиционного регулирования может быть использован любой измерительный прибор. Широкое распространение в позиционном регулировании получили также регулирующие милливольтметры и логометры.

Астатические регуляторы. Автоматические регуляторы, у которых при отклонении регулируемой величины от заданного значения регулирующий орган перемещается со скоростью, пропорциональной этому отклонению, называются астатическими. Закон регулирования астатического регулятора выражается уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = kx\,,\ W(p) = \frac{k}{p}\ , \qquad (3.9.1)$$

где $y$ – регулирующее воздействие; $x$ – сигнал рассогласования; $k$ – параметр настройки регулятора. На рис. 3.23 показана схема астатического регулятора давления прямого действия, в котором чувствительным и управляющим элементом является мембрана. Силу, противодействующую перемещению мембраны 1 и плунжера 2 вниз, создает масса груза 3. Груз подвешен к свободному концу рычага 4, имеющего точку опоры 5. Другой конец рычага скреплен со штоком регулирующего органа. Плунжер может находиться в равновесии лишь при условии равенства моментов сил, создаваемых давлением среды над мембраной и весом груза 3. При постоянной массе груза перемещение плунжера зависит только от изменения давления среды над мембраной.

Давление над мембраной, при котором моменты сил равны, соответствует заданному. При уменьшении (увеличении) давления плунжер будет перемещаться вверх (вниз) до тех пор, пока давление не станет равным заданному. На рис. 3.23б представлена кривая переходного процесса при регулировании астатическим регулятором.

Статические регуляторы. Статическим или пропорциональным П (рис. 3.24) называется такой регулятор, величина перемещения регулирующего органа которого пропорциональна отклонению регулируемого параметра. Пропорциональная зависимость достигается за счет действия жесткой обратной связи. Закон регулирования П- регулятора выражается уравнением

$$y = k_p x\,,\ W(p) = k_p\ , \qquad (3.9.2)$$

где $k_p$ - коэффициент передачи (усиления), являющийся параметром настройки регулятора.

Изодромные регуляторы. Закон регулирования изодромного, или ПИ- регулятора может быть выражен в виде:

$$y = k_p(x + \frac{1}{T_u}\int x(t)dt),\ W(p) = kp\frac{1+T_u p}{T_u p}\ , \qquad (3.9.3)$$

где $T_u$ – время упругой обратной связи, или время изодрома. Действие изодромного регулятора можно рассматривать как совместное действие статического П - регулятора и астатического И- регулятора.

На рис. 3. 25 показана кривая переходного процесса изодромного регулятора. Изодромный регулятор применяют при быстро и резко меняющихся нагрузках.

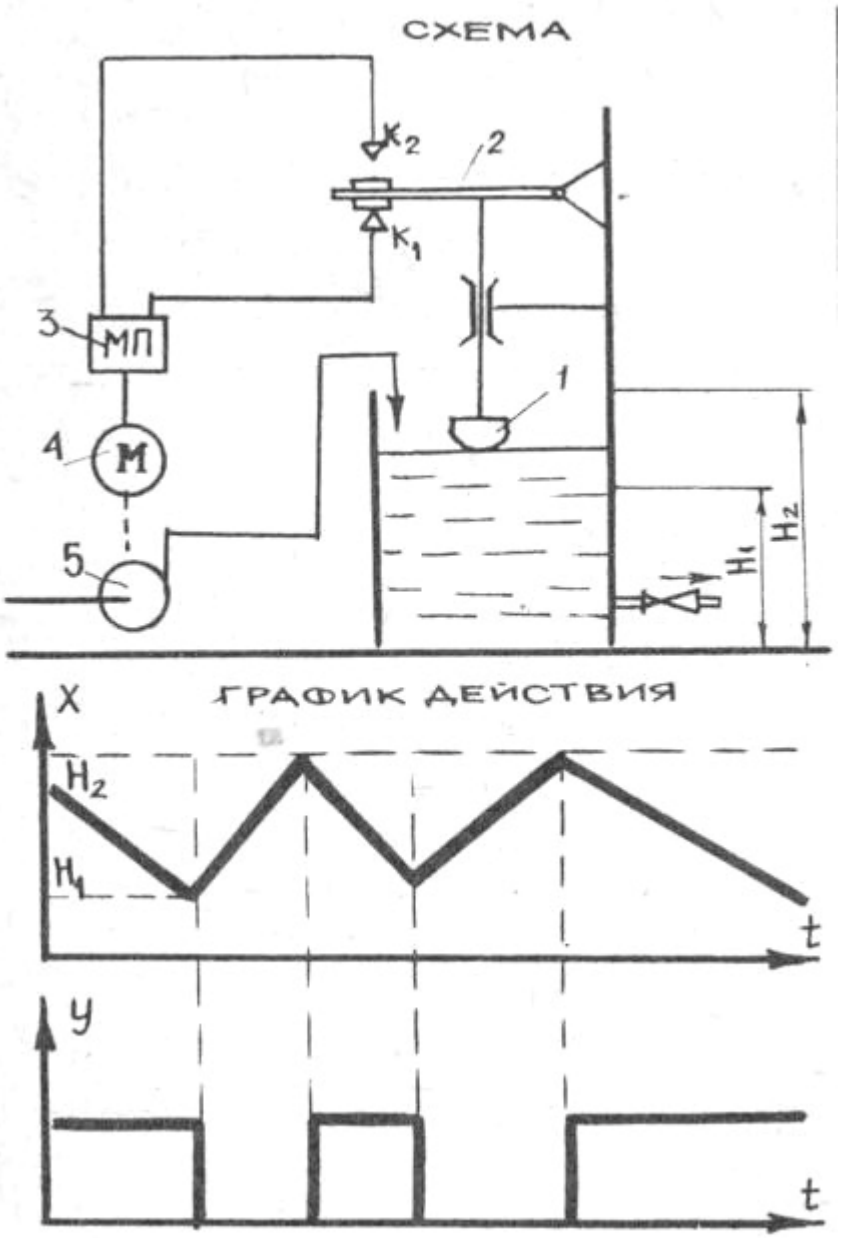



**Рис. 3.22**

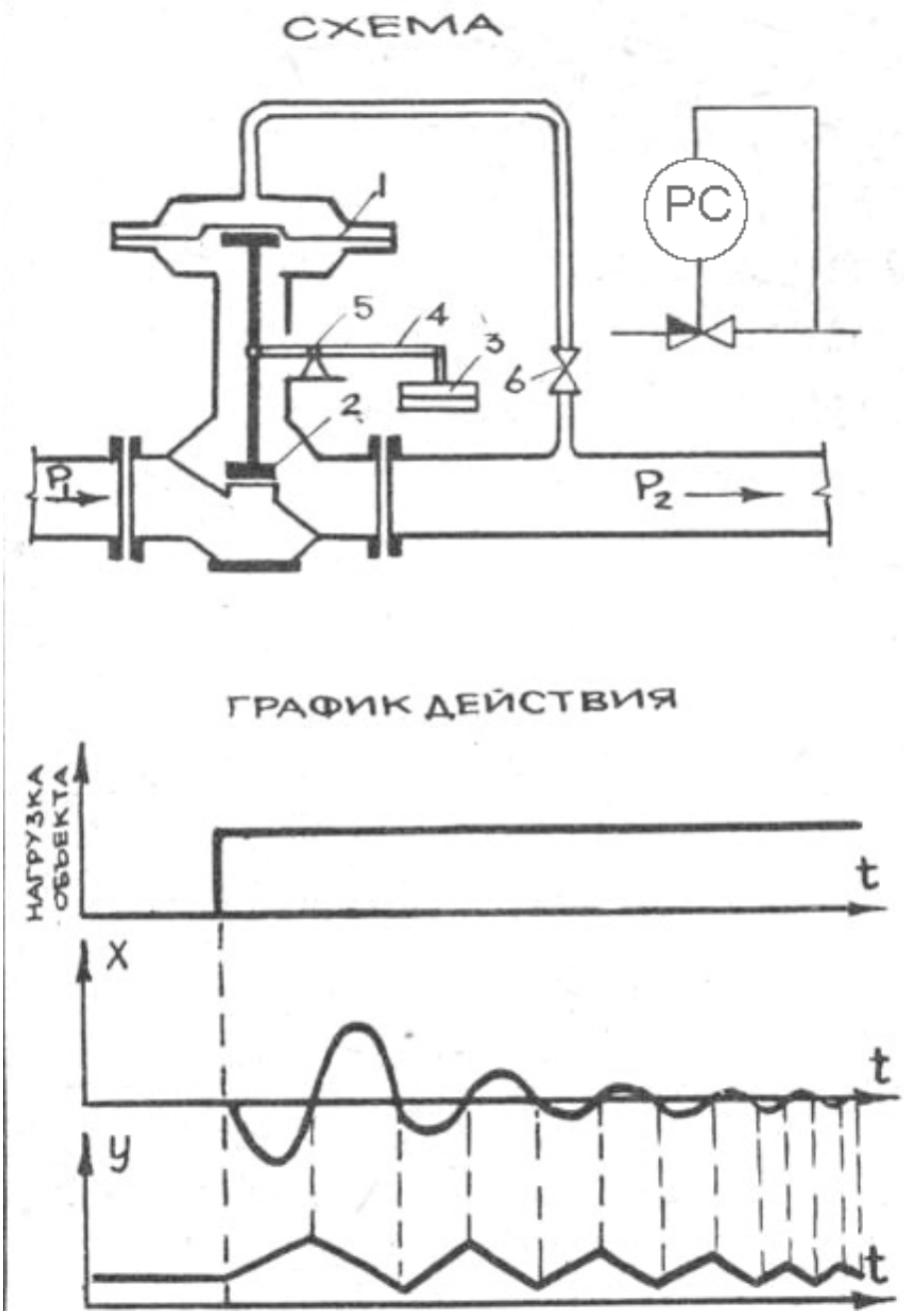


СХЕМА
PC
1
2
3
4
5
6
P1
P2
ГРАФИК ДЕЙСТВИЯ
НАГРУЗКА ОБЪЕКТА
t
X
t
y
t

**Рис. 3.23**

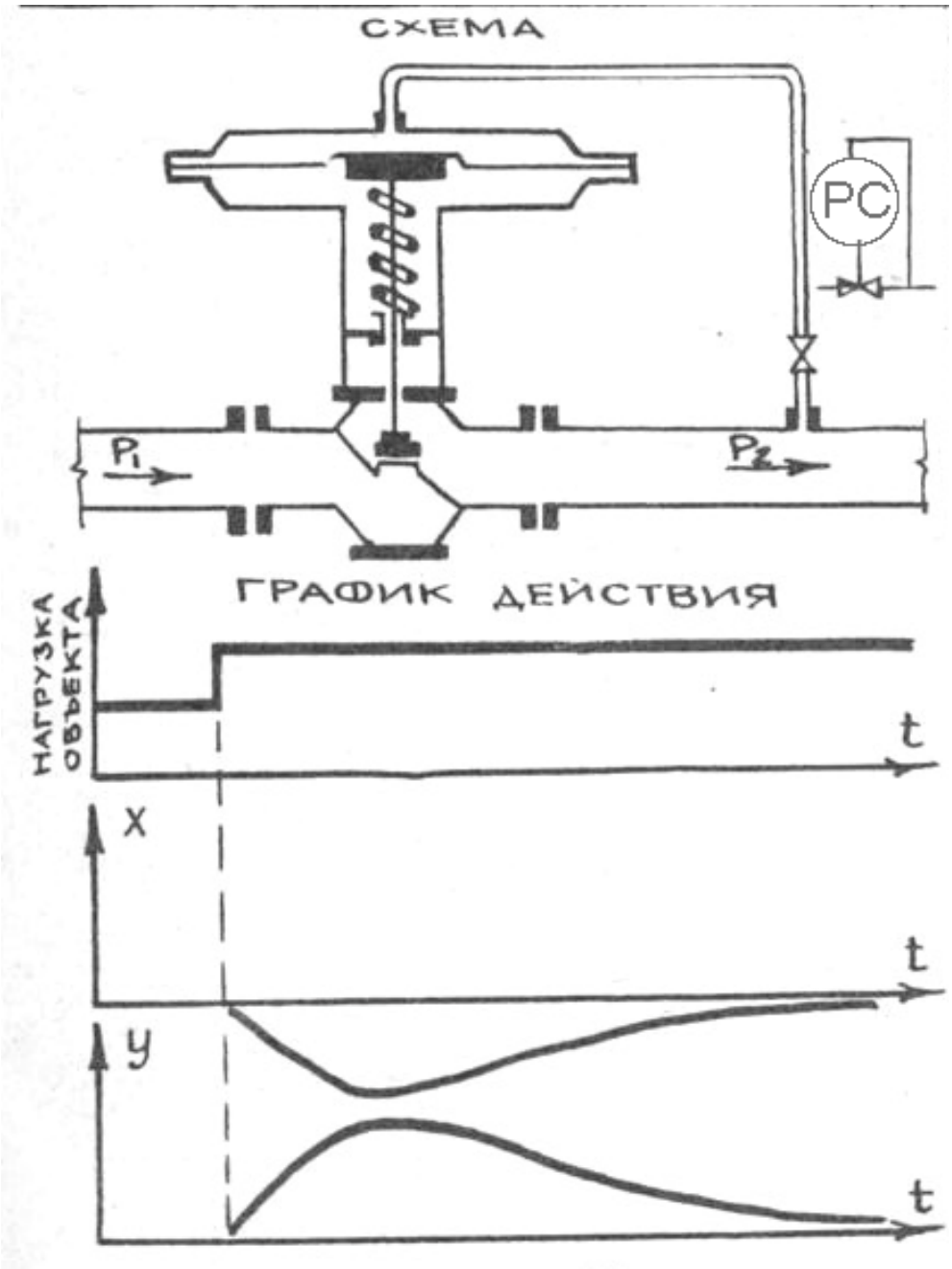
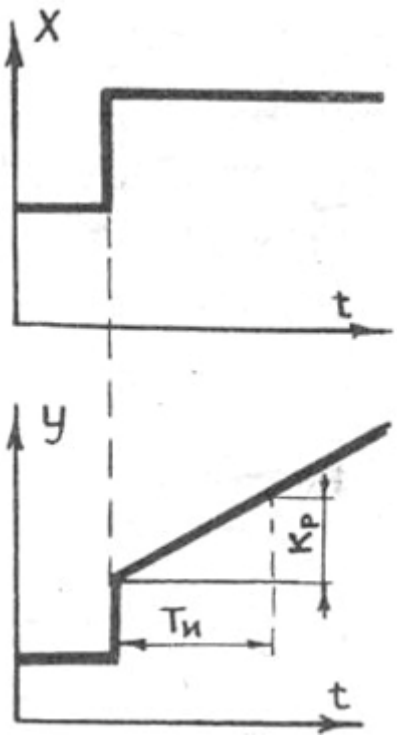



**Рис. 3.24**



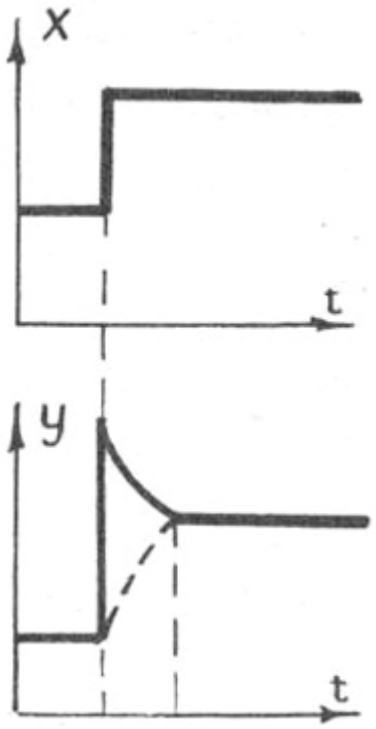




**Рис. 3.25** **Рис. 3.26**

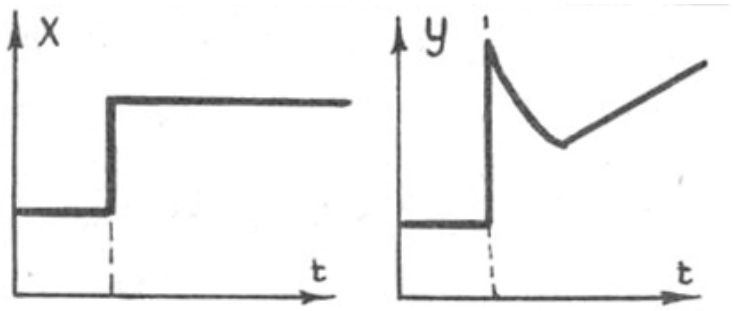



**Рис. 3.27**

Пропорционально-дифференциальные регуляторы. Закон регулирования пропорционально-дифференциальных ПД-регуляторов выражается уравнением:

$$y = k(x \pm T_\partial \frac{dx}{dt}) \ , \ W(p) = k(1 \pm T_\partial p) \, , \qquad (3.9.4)$$

где $T_\partial$ – время предварения. Благодаря дифференциальной составляющей качество процесса регулирования с ПД- регулятором улучшается по сравнению с П- регулятором (рис. 3.26 ).

Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД)- регуляторы. Действие ПИД- регулятора можно рассматривать как совместное действие статического П- и астатического И- регуляторов с дополнитель-

ным воздействие по скорости изменения регулируемой величины. Закон регулирования ПИД- регулятора записывается в виде:

$$y = k(x + \frac{1}{T_u}\int xdt \pm T_\partial \frac{dx}{dt}),\ W(p) = k\frac{1 + T_u p \pm T_u T_\partial p^2}{T_u p}\ , \qquad (3.9.5)$$

где статический коэффициент передачи $k$, время изодрома $T_u$ и время предварения $T_\partial$ являются параметрами настройки регулятора. Характеристика действия ПИД- регулятора представлена на рис. 3.27.

Данные по современным промышленным регуляторам фирмы «ОВЕН» приведены в каталогах [ 11, 12].

# ГЛАВА 4. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ

## 4.1. Электромагнитные, магнитоэлектрические, индукционные и электротепловые реле

Ниже на рис. 4.1 представлена схема геркона – миниатюрного электромагнитного реле. На рис. 4.2 изображены схемы трех поляризованных электромагнитных реле, на рис. 4.3 – схема магнитоэлектрического реле, на рис. 4.4 – схема индукционного реле, на рис. 4.5– схема электротеплового реле.

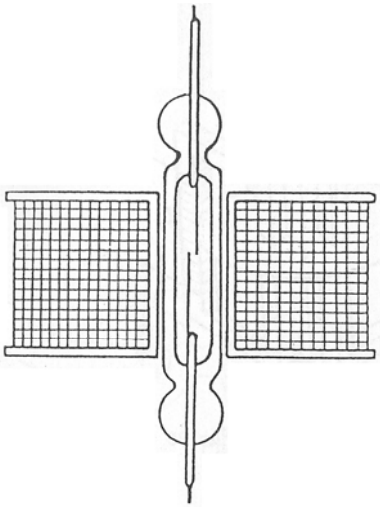
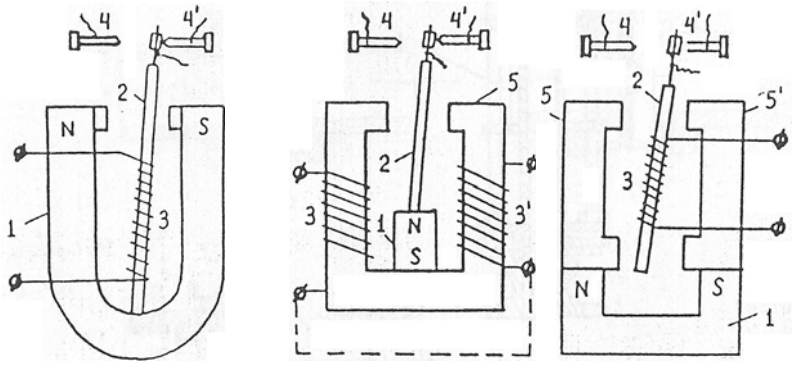


**Рис. 4.1. Электромагнитное реле язычкового типа (геркон)**




**а)** **б)** **в)**

**Рис. 4.2. Поляризованные электромагнитные реле:**
**а) реле с подковообразным магнитом; б) реле с раздвоенным полюсом магнита; в) реле с мостовой магнитной цепью (1 – постоянный магнит, 2 – якорь, 3 и 3' – катушки, 4 и 4' – неподвижные контакты, 5 и 5' – магнитопроводы)**

При подаче тока в обмотку геркона (рис. 4.1) внутри катушки создается магнитное поле, ферромагнитные язычки замыкают цепь. Характер

срабатывания поляризованных электромагнитных реле (рис. 4.2, замыкание контактов 4 или 4’) зависит от направления тока в обмотках 3.

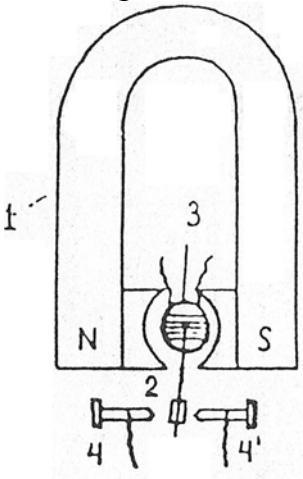



**Рис 4.3. магнитоэлектрическое реле ( 1 – постоянный магнит, 2 – рычаг с подвижным контактом, 3 – подвижная рамка, 4 и 4’- неподвижные контакты)**

В магнитоэлектрическом реле (рис. 4.3) при пропускании тока через рамку она поворачивается в поле постоянного магнита и замыкает контакты 4 или 4’. При отсутствии тока под действием пружины рамка возвращается в горизонтальное положение.

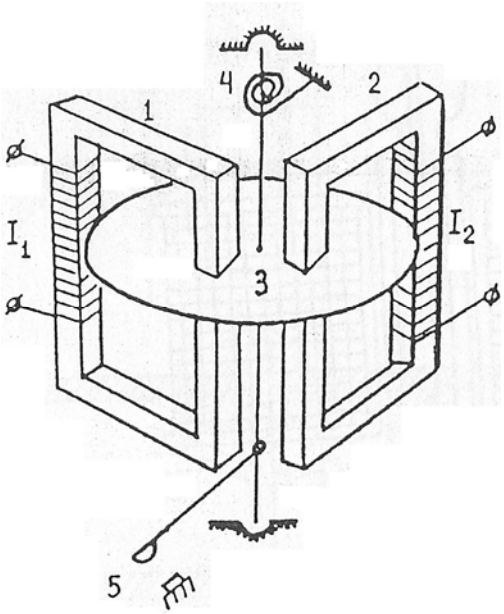



**Рис. 4.4. Индукционное реле (1 и 2 – электромагниты, 3 – диск, 4 – пружина, 5 – контакты)**

В индукционном реле (рис. 4.4) в зазоре электромагнитов может поворачиваться вокруг своей оси алюминиевый или медный диск 3. В обмотках электромагнитов протекают переменные токи $I_1$ и $I_2$. Момент вращения, действующий на диск, равен $M = kI_1I_2\sin\varphi$, где $\varphi$ - сдвиг фаз токов $I_1$ и

$I_2$. относительно друг друга. Момент вращения направлен в сторону электромагнита с отстающим по фазе током.

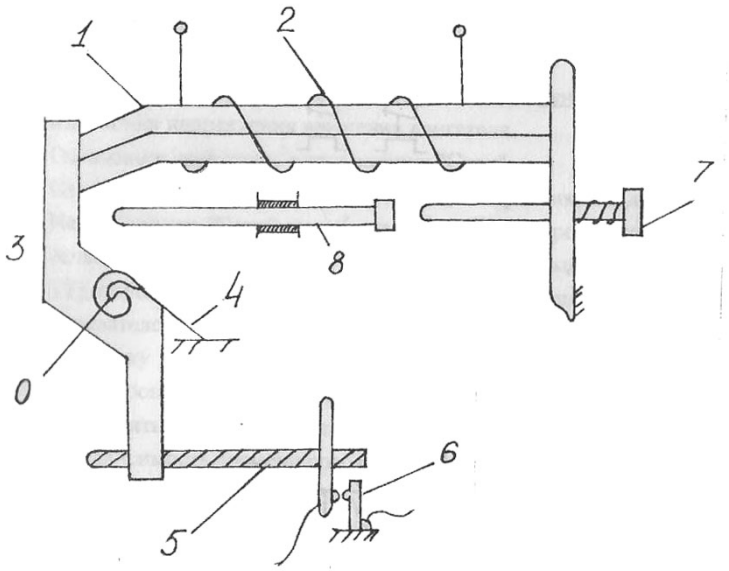



**Рис. 4.5. Конструктивная схема теплового реле**

Принцип действия электротеплового реле (рис. 4.5) заключается в следующем. При нагревании током, проходящим через спираль 2 нагревательного элемента (иногда непосредственно через пластинку 1), биметаллическая пластинка изгибается в сторону металла с меньшим температурным коэффициентом линейного расширения. При достижении определенной температуры свободный конец пластинки 1 выводится за рычаг 3, который под воздействием пружины 4 поворачивается относительно оси О. Связанная с рычагом 3 тяга 5 перемещается влево, размыкая контакты реле 6. Питание обмотки линейного контактора прекращается, и двигатель отключается. Чтобы снова включить двигатель, необходимо вернуть реле в исходное положение, нажав кнопку возврата 7. При этом рычаг 3 толкателем 8 заводится за свободный конец остывшей пластинки 1, и контакты замыкаются.

## 4.2. Контакторы и магнитные пускатели

Ниже на рис. 4.6–4.8 представлены схемы контакторов и магнитных пускателей, управление с их помощью асинхронными двигателями.

Контактором (силовым реле) называют электромагнитное реле, имеющее мощную контактную систему (главные контакты), служащую для коммутации силовых цепей потребителей электроэнергии и приводимую в движение электромагнитом. Контактор снабжается также блокирующими контактами и дугогасительной камерой.

При подаче напряжения $U_k$ на катушку 1 сердечник 2 намагничивается и притягивает якорь 3, сжимая пружины 4. Силовые контакты 5 и 6 замыкаются и обеспечивают протекание тока от источника с напряжением $U_c$ через нагрузку с сопротивлением $R_н$.

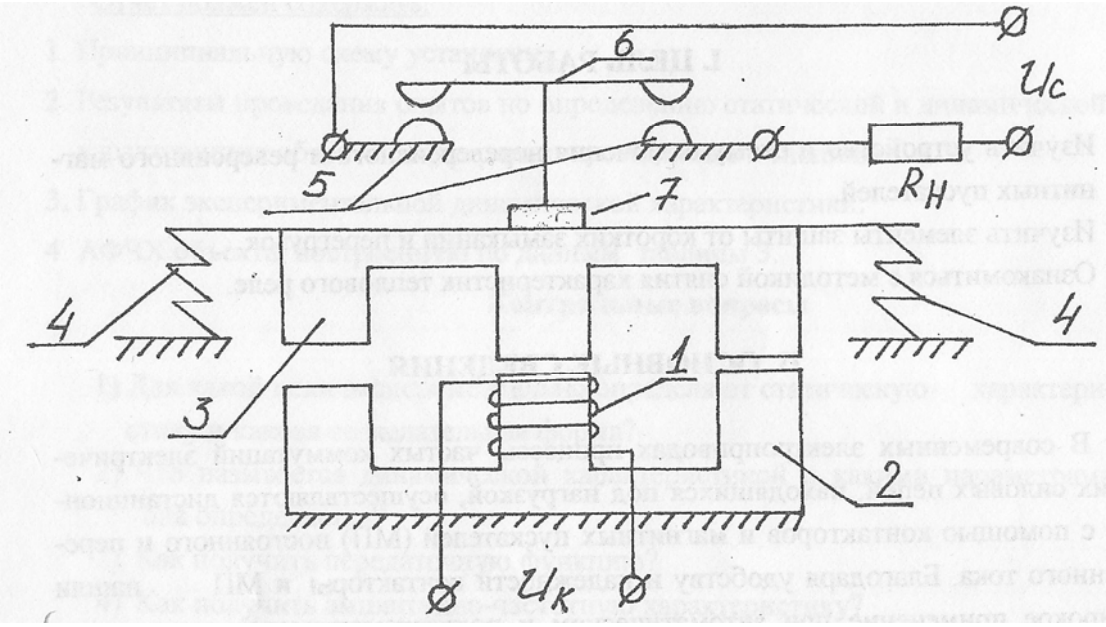



**Рис. 4.6. схема контактора (1 – втягивающая катушка; 2 – неподвижный сердечник, 3 – якорь (подвижный сердечник); 4 – пружина; 5 – неподвижные контакты; 6 – подвижные контакты; 7 – изолятор; *Rн* – сопротивление нагрузки)**

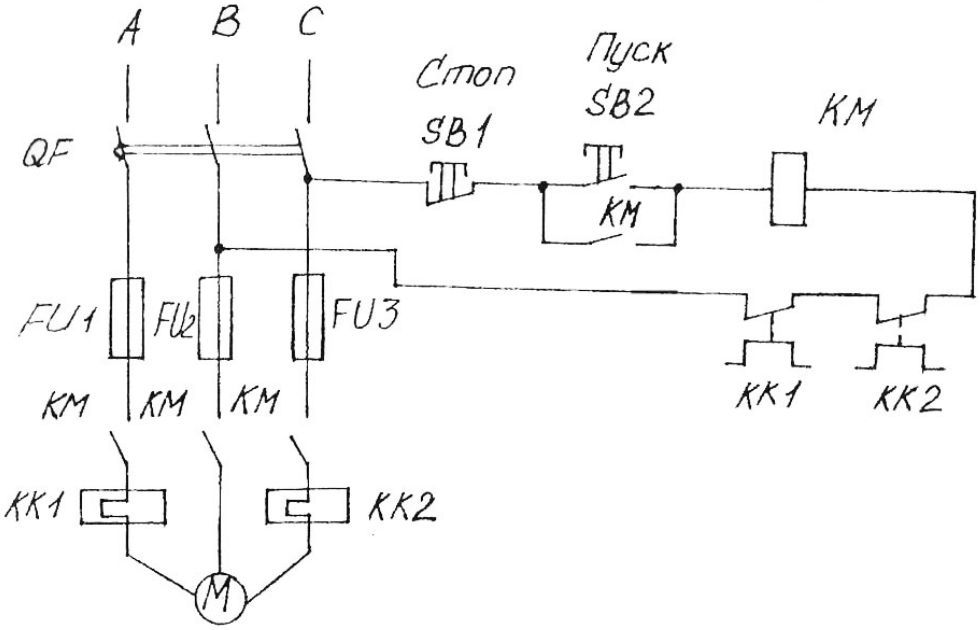



**Рис. 4.7. Схема управления трехфазным асинхронным двигателем при помощи нереверсивного магнитного пускателя (МП)**

При разработке схем управления используют условные графические и буквенные обозначения элементов электрических схем, приведенные в таблице 1.

Схема включения контактора приведена на рис. 4.7. При нажатии кнопки SB2 («Пуск») ток идет по цепи: A-SB1-SB2-KM-C. Питание поступает на обмотку контактора КМ, намагничивается неподвижный сердечник и притягивает подвижную часть магнитной системы (якорь) с закрепленными на ней подвижными контактами КМ. Замыкание контактов КМ включает цепи питания обмоток электродвигателя, двигатель запускается. Замыкание контакта КМ в цепи управления блокирует кнопку SB2, которая теперь может быть отпущена; цепь A-SB1-KM-KM-C замкнута, и двигатель продолжает работать. При нажатии кнопки SB1 («Стоп») цепь питания обмотки КМ размыкается, подвижные контакты КМ под действием возвратных пружин перемещаются в сторону размыкания, двигатель останавливается.

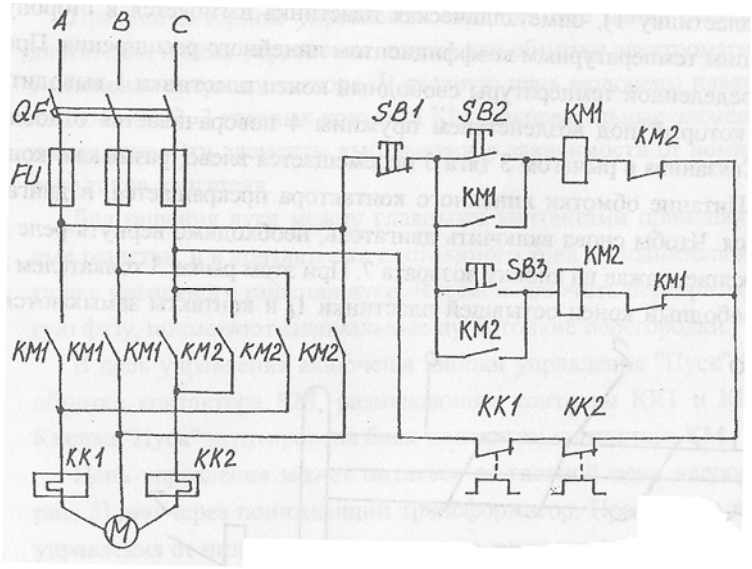



**Рис. 4.8. Схема реверсивного МП**

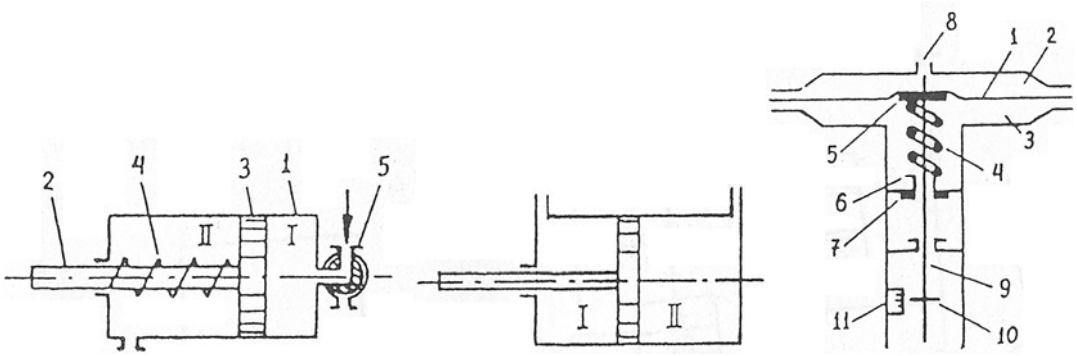
Схема состоит из контакторов КМ1 («Вперед») и КМ2 («Назад»), обеспечивающих реверсирование двигателя; кнопок «Пуск» SB2 и SB3, кнопки «Стоп» SB1, блок-контактов КМ1 и КМ2 и тепловых реле КК1 и КК2. Схема работает аналогично описанной выше. Реверсирование двигателя осуществляется благодаря перемене фаз питающего напряжения.

Во избежание ошибочного одновременного включения контакторов КМ1 и КМ2 их цепи управления взаимно блокируются так, чтобы при включении одного из них цепь управления второго была разомкнута: при включении контактора КМ1 его размыкающий контакт в цепи обмотки контактора КМ2 размыкается. Графические и буквенные обозначения элементов электрических схем приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

**Графические и буквенные обозначения элементов лектрических схем**

| Наименование | Графическое обозначение | Буквенное обозначение | |
|---|---|---|---|
| | | однобукв. | двухбукв. |
| Обмотка реле, контактора и магнитного пускателя | | K | KM |
| Реле токовое | | K | KA |
| Реле напряжения | | K | KV |
| Реле времени | | K | KT |
| Реле поляризованное | | K | KP |
| Реле электротепловое | | K | KK |
| Контакты реле, контактора, магнитного пускателя:<br>- замыкающие;<br>- размыкающие;<br>-переключающие | | K | KM |
| Кнопки управления с самовозвратом:<br>- с замыкающим контактом;<br>- с размыкающим контактом;<br>- с одним замыкающим и одним размыкающим контактом | | S<br>S<br>S | SB<br>SB<br>SB |
| Контакты электротеплового реле | | K | KK |
| Контакты неэлектрического реле (датчика, конечного выключателя и т.п.):<br>- замыкающий;<br>- размыкающий;<br>- предохранитель плавкий | | S<br>S<br>F | SQ<br>SQ<br>FU |
| Выключатель многополюсный:<br>- однолинейное изображение<br>- многолинейное изображение | | Q<br>Q | SQ<br>SQ |
| Двигатели<br>Фазы питающей сети<br>Нулевой привод | | M<br>A, B, C<br>N | |




а) б) в)

**Рис. 4.9. Схемы исполнительных элементов: а – поршневого одностороннего действия (1 – цилиндр, 2 – шток, 3 – поршень, 4 – возвратная пружина, 5 – штуцер); б – поршневого двустороннего действия, в – мембранный (1 – резиновая мембрана, 2 и 3 – крышки, 4 – спиральная пружина, 5 – металлический диск, 6 – втулка, 7 – гайка, 8 - отверстие, 9 – шток, 10 – диск, 11 – шкала)**

## 4.3. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

На рис. 4.9 изображены схемы некоторых исполнительных элементов, на рис. 4.10, 4.11 – схемы регулирующих клапанов, на рис. 4.12- 4.14 представлены схемы регуляторов уровня, давления и температуры прямого действия.

**а)** **б)**

**Рис.4.10. Схемы регулирующих органов: а – клапана; б – заслонки**

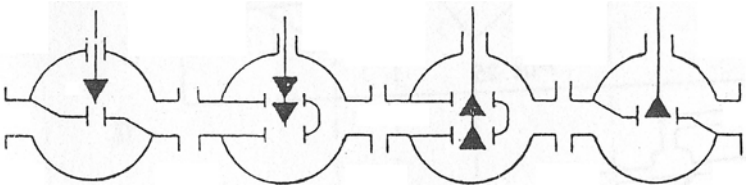
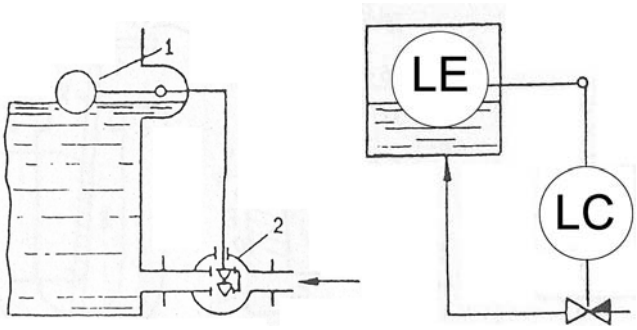
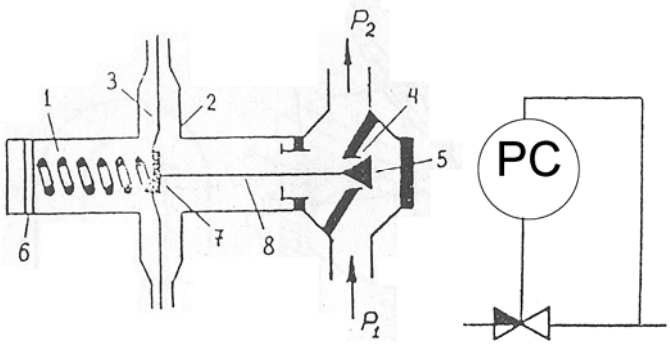


**Рис. 4.11. Схемы регулирующих клапанов**



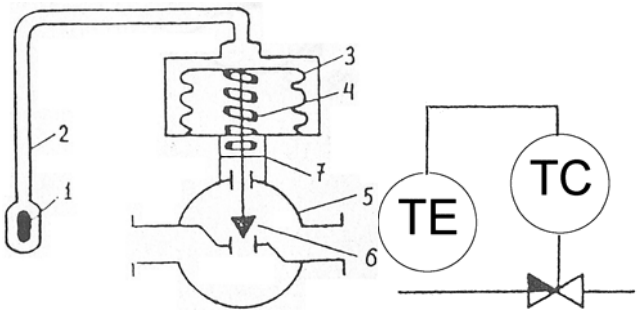

**а)** **б)**

**Рис. 4.12. Регулятор уровня прямого действия: а – схема (1 – поплавок, 2 – регулирующий орган); б – условное изображение по ГОСТу**




а) б)

**Рис. 4.13. Регулятор давления прямого действия: а – схема (1 – пружина, 2 – полость регулятора, 3 – мембрана, 4 – входное отверстие, 5 – золотник, 6 – гайка, 7 – рычаг); б – условное обозначение по ГОСТу**




а) б)

**Рис. 4.14. Регулятор температуры прямого действия: а – схема (2 – термобаллон манометрического термометра, 2 – капиллярная трубка, 3 – гармониковая мембрана, 4 – пружина, 5 – регулирующий клапан, 6 – золотник, 7 – задатчик); б – условное изображение по ГОСТу**

# ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

## 5.1. Автоматизация поточно-транспортных систем (конвейерных линий)

Конвейеры используются во всех сферах производства, в том числе и в строительном производстве. Конвейерам уже более 100 лет. Пространственные размеры конвейеров заключаются в пределах от нескольких метров до десятков километров.

Рассмотрим конвейер, содержащий всего три звена (рис. 5.1). Схема управления этим конвейером изображена на рис. 5.2.

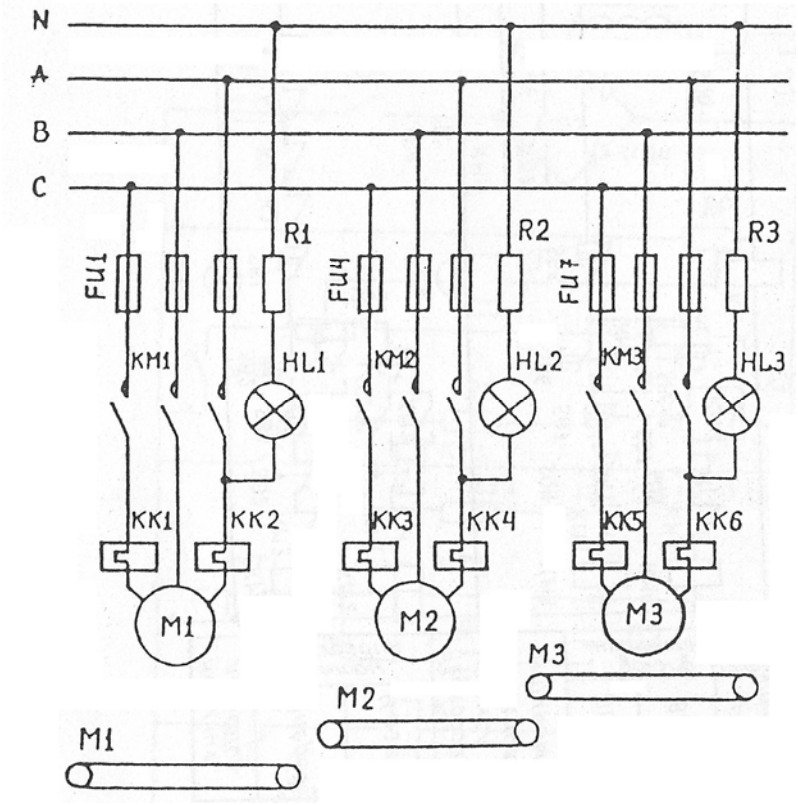



**Рис. 5.1. Конвейер, содержащий три звена**

Работа всех конвейерных линий подчиняется шести основополагающим принципам: 1) должны предусматриваться следующие режимы: а) рабочий, или автоматический; б) местный, или отладочный; в) режим отдыха; 2) запуск звеньев конвейера в рабочем режиме должен производиться последовательно в направлении от конца конвейера к его началу. Это делается во избежание завала конвейера материалом в случае отказа какого-либо звена; 3) отключать работающий конвейер надо последовательно в направлении от начала конвейера к его концу; 4) перед запуском конвейера в автоматическом режиме необходимо подавать предупредительную сигнализацию; 5) при работе конвейера в автоматическом режиме в случае ос-

тановки какого-либо звена все звенья, участвующие в подаче материала на поврежденное звено, должны автоматически отключаться, а звенья, участвующие в отводе материала от поврежденного звена, должны продолжать работу; 6) в случае возникновения аварийной ситуации должна быть предусмотрена возможность отключения конвейера с любого места.

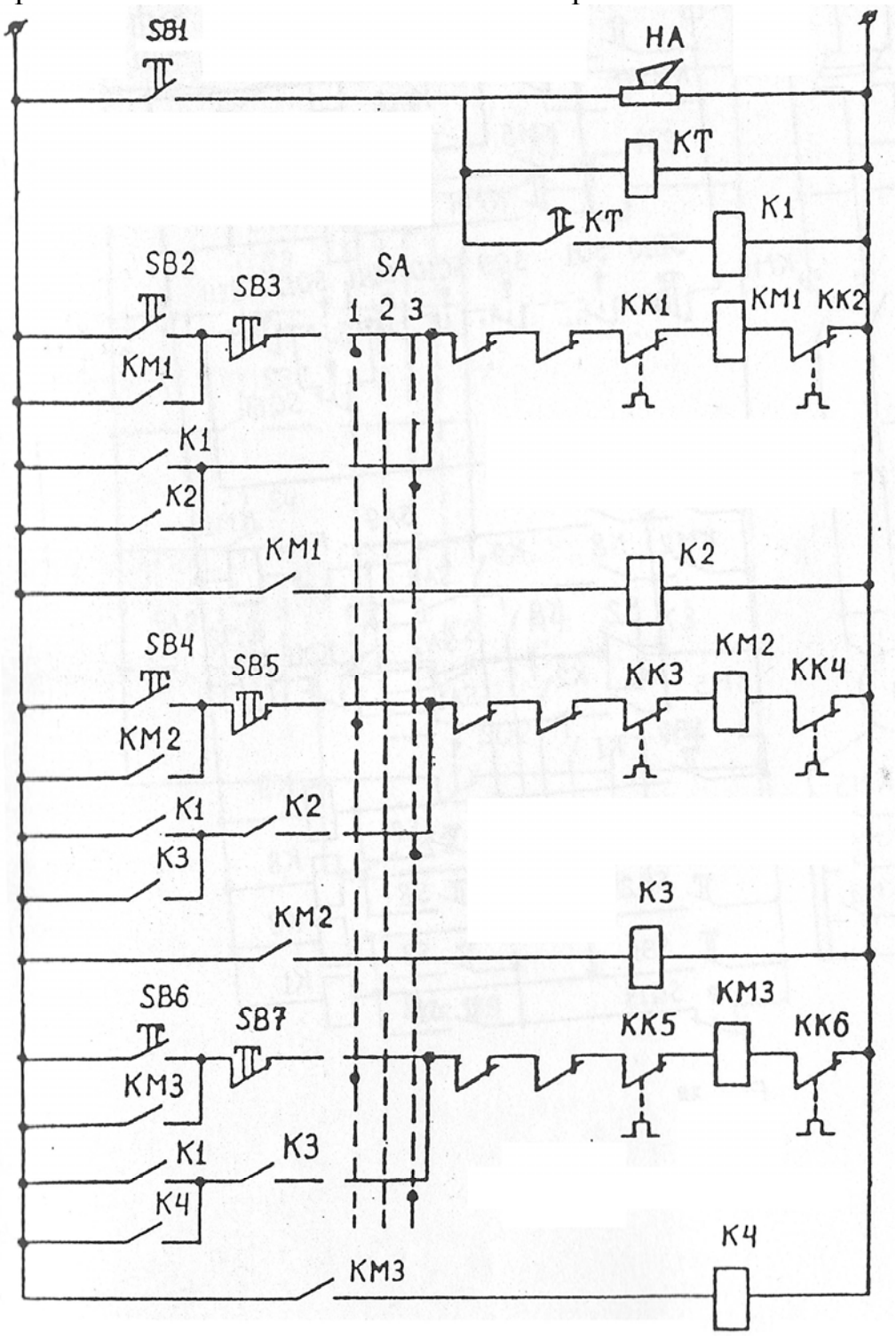



**Рис. 5.2. Схема управления конвейером (рис. 5.1)**

Рассмотрим схему управления данным конвейером (рис. 5.2). Звенья конвейера запускаются с помощью двигателей М1, М2 и М3. При установке переключателя SA в положение 1 (рис. 5.2) осуществляется раздельное (местное) управление двигателями; при установке SA в положение 3 реализуется централизованное (автоматическое) управление. В местном режиме двигатели включаются раздельно кнопками «Пуск» SB2, SB4 и SB6, а отключаются, соответственно, кнопками «Стоп» SB3, SB5 и SB7. В автоматическом режиме пуск конвейера осуществляется кнопкой SB1 и сопровождается звуковой сигнализацией. Положение 2 переключателя SA соответствует режиму отдыха.

Рассмотрим работу конвейера в местном режиме. Переключатель SA ставится в положение 1. При нажатии кнопки SB2 питание поступает на обмотку контактора КМ1, он срабатывает, и замыкаются 5 его контактов. Запускается двигатель М1. Для его отключения используется кнопка «Стоп» SB3. Аналогично запускаются все другие звенья.

Работа конвейера в автоматическом режиме начинается с установки переключателя SA в положение 3. После нажатия кнопки SB1 включается предупредительная сигнализация – звучит сирена НА. Напряжение поступает на обмотку реле времени КТ. С задержкой во времени замыкается его контакт, и питание подается на реле сигнализации К1. Замыкаются три его контакта. Питание поступает на обмотку контактора КМ1. Он срабатывает, замыкаются 5 его контактов, начинает работать двигатель М1. Срабатывает реле К2, замыкаются два его контакта, питание подается на обмотку контактора КМ2, замыкаются 5 его контактов, запускается двигатель М2, срабатывает реле К3, замыкаются два его контакта, срабатывает контактор КМ3, замыкаются 5 его контактов, запускается двигатель М3 и т.д. Легко видеть, что все принципы управления конвейерами здесь соблюдаются.

## 5.2. Автоматизация подъемно-транспортных систем

К подъемно-транспортным устройствам относятся лифты пассажирские и грузовые, шахтные подъемники, скипы и подобные устройства. Строительные краны по существу также являются подъемно-транспортными устройствами.

### Автоматизация электропривода пассажирского лифта

История лифтостроения насчитывает уже более двух тысячелетий. Первый лифт создал, по-видимому, Архимед.

Рассмотрим схему автоматизированного электропривода современного типового тихоходного пассажирского лифта ( рис. 5.3).

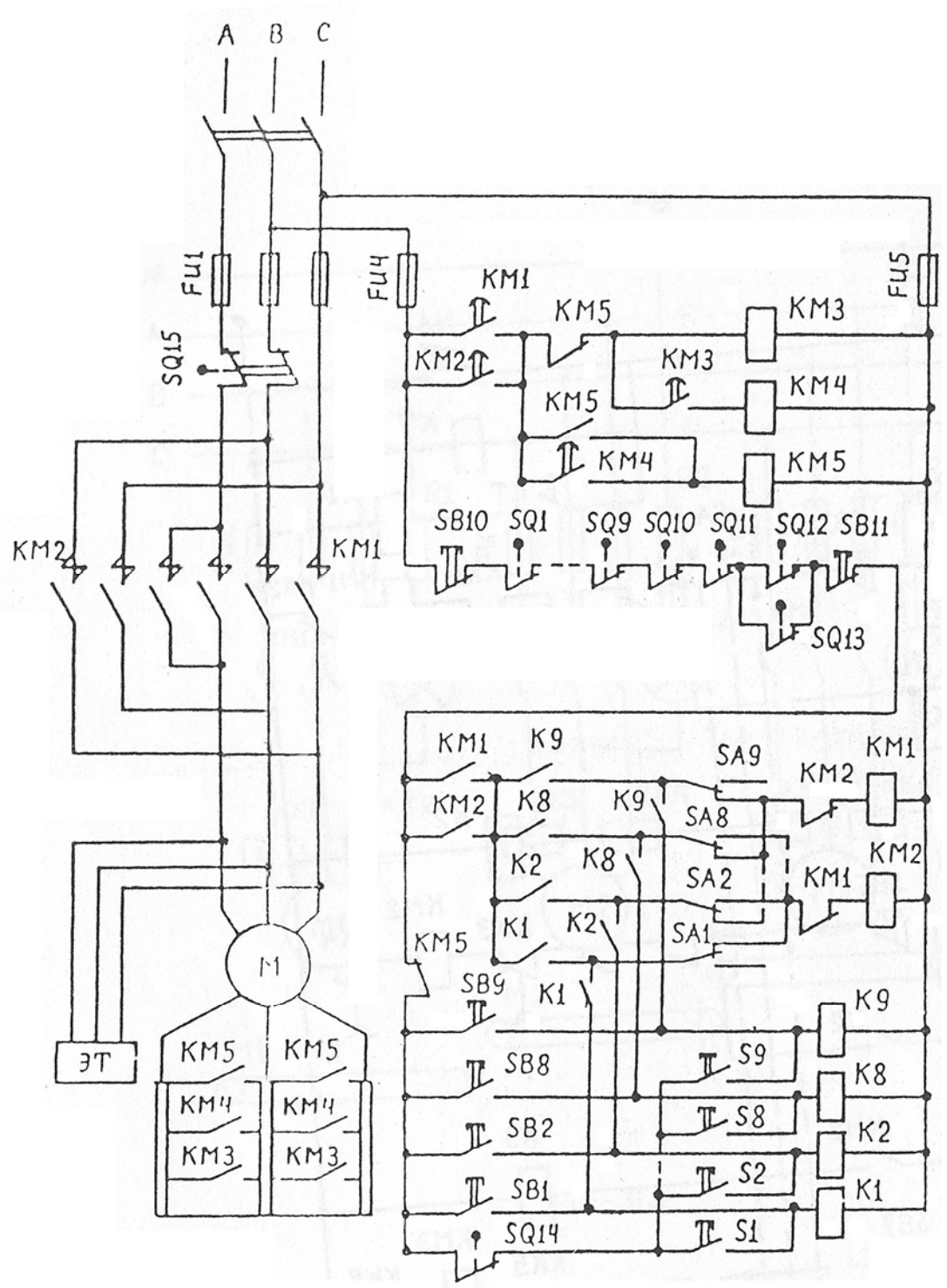



**Рис. 5.3. Схема автоматизированного электропривода пассажирского лифта**

Привод лифта осуществляется от асинхронного двигателя М, пуск которого производится в три ступени. На схеме (рис. 5.3) SB1, …, SB9 – это кнопки приказа, расположенные в кабине; S1, …, S9 – кнопки вызова лифта на этажах; K1, …, K9 – этажные реле (располагаются на общей панели управления); SA1, …, SA9 – этажные переключатели; KM1 и KM2 –

контакторы движения «вверх» и «вниз», соответственно; КМ3, КМ4 и КМ5 – контакторы ускорения двигателя; SQ1, …, SQ9 – конечные выключатели дверей шахты; SQ10, SQ11 и SQ12 – конечные выключатели ловителя, контроля натяжения канатов и дверей кабины, соответственно; SQ13, SQ14 – конечные выключатели пола кабины; SQ15 – контакты конечного выключателя, ограничивающего ход кабины вверх и вниз в аварийных случаях.

Рассмотрим работу схемы, когда человек, находясь на площадке первого этажа, вызывает лифт. Он нажимает при этом кнопку S1. В случае исправного лифта срабатывает этажное реле К1, и замыкаются два его контакта. Питание через этажный переключатель SA1 подается на обмотку контактора КМ2. Срабатывают шесть его контактов, причем один из них – с задержкой во времени. Через последний питание поступает на контактор ускорения КМ3, от него (также с задержкой во времени) – на контактор ускорения КМ4, а от него уже (с такой же задержкой во времени) – на последнюю ступень ускорения двигателя – контактор КМ5. После этого скорость вращения двигателя достигает заданной величины, и контакторы ускорения КМ3 и КМ4 отключаются. По достижении кабиной первого этажа срабатывает этажный переключатель SA1 и снимает напряжение с контактора КМ1.

Пусть вызвавший лифт человек заходит в кабину и намерен поехать на восьмой этаж. Он нажимает кнопку SB8, питание поступает на этажное реле К8. Оно срабатывает, замыкаются два его контакта, через переключатель SA8 питание поступает на обмотку контактора КМ1. Срабатывают шесть его контактов, причем один из них – с задержкой во времени. Через него питание поступает на контакторы ускорения КМ3, КМ4, КМ5, двигатель разгоняется, набирает нужную скорость вращения, контакторы КМ3 и КМ4 отключаются. За счет переброски фаз В и С питающего напряжения двигатель вращается в другую сторону, т.е. реверсируется. Кабина движется вверх и при достижении восьмого этажа срабатывает этажный переключатель SA8, обесточивая катушку КМ1. Кабина останавливается.

Грузовые лифты на релейно-контакторном управлении работают аналогично.

Следует отметить, что в последние 2-3 десятилетия, в связи с бурным развитием микроэлектроники, созданием быстродействующих микропроцессоров лифтостроение получило мощное развитие. Самые современные лифты в высотных домах построены в США, ОАЭ, Китае.

## Автоматизация строительных кранов

Рассмотрим некоторые вопросы автоматизации строительных кранов. Начнем с автоматической защиты кранов при обрыве проводов пита-

ния. Электрическое питание к строительным кранам часто подается с помощью гибких оголенных проводов – троллеев. При обрыве проводов в случае, например, сильного порыва ветра или в других случаях возможно их падение на землю и поражение электрическим током людей. Во избежание этого применяется автоматическая защита от обрыва проводов.

Схема защиты, представленная на рис. 5.4 , работает следующим образом. При нажатии кнопки «Пуск» SB1 питание подается на обмотку контактора *КМ*, замыкаются его контакты, подающие питание на двигатель крана и к обмоткам промежуточных реле *К*1, *К*2, *К*3, которые подключены в конце троллейной линии.. Замыкаются контакты этих реле в цепи управления, после чего кнопку *SB*1 можно отпустить: катушка КМ будет получать питание через замкнувшийся блок-контакт КМ. При обрыве одного из проводов (троллеев) напряжение на двух из трех промежуточных реле *К*1, *К*2, *К*3 (соединенных с оборванным проводом) упадет вдвое, что приведет к их отключению. В результате отключится контактор КМ. Это приведет к снятию напряжения с троллеев раньше, чем оборванный провод упадет на землю.

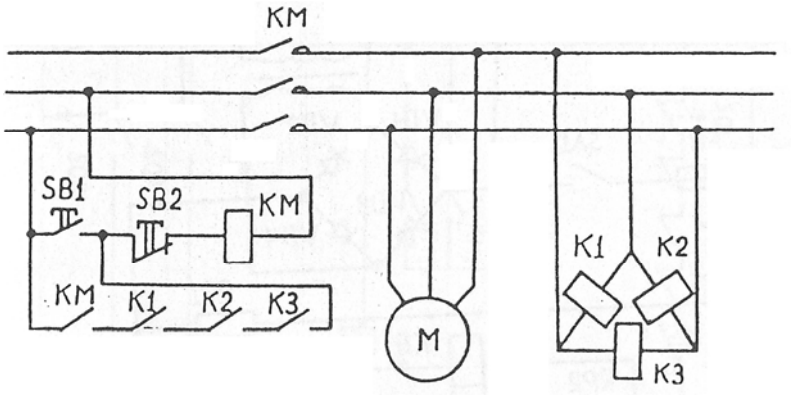



**Рис. 5.4. Схема I автоматической защиты крана при обрыве контактных проводов**

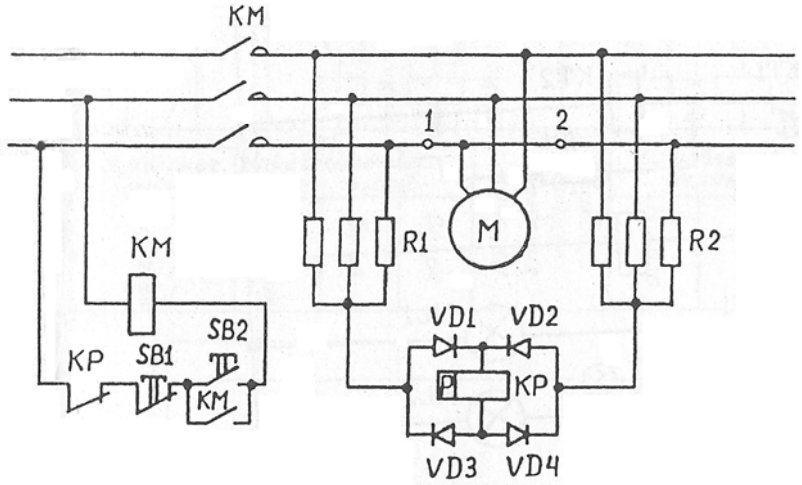



**Рис. 5.5. Схема II автоматической защиты крана при обрыве проводов**

На рис. 5.5 представлена другая схема автоматической защиты крана от обрыва проводов. При нормальной работе крана потенциалы точек $O_1$ и $O_2$ (являющихся общими точками трехфазных сопротивлений $R_1$ и $R_2$), равны нулю. При обрыве одного из троллеев ( например, в точках 1 или 2) потенциал узла $O_1$ остается нулевым, а потенциал узла $O_2$ становится равным половине линейного напряжения (190 В). Это приводит к срабатыванию реле КР, отключению контактора КМ и снятию напряжения с троллеев.

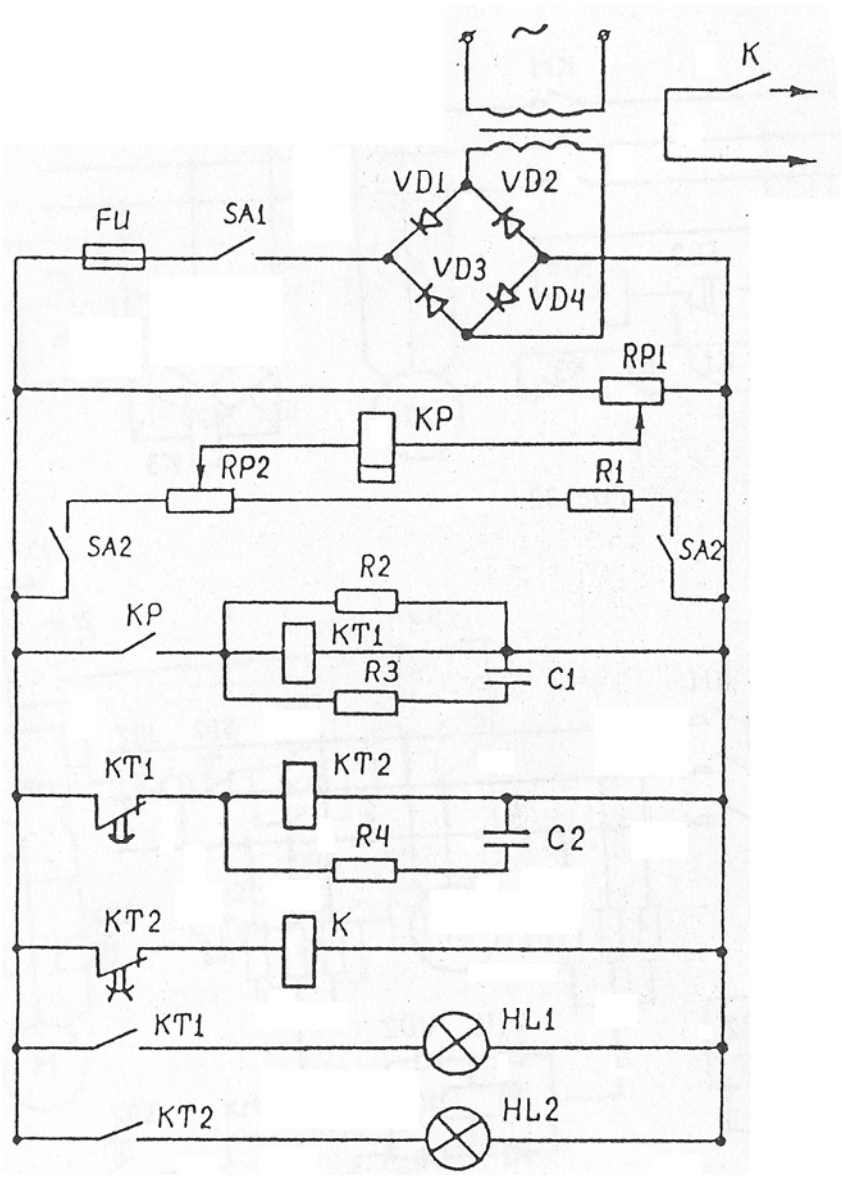



**Рис. 5.6. Электрическая схема автоматического ограничителя грузоподъемности башенных кранов**

Важным вопросом в работе кранов является автоматическое ограничение грузоподъемности во избежание их опрокидывания при перегрузках. Рассмотрим схему автоматического ограничения грузоподъемности, представленную на рис. 5.6.

Основной частью схемы является электрический мост, образованный задатчиком предельного веса – потенциометром *RP*1 и датчиком веса поднимаемого груза – потенциометром *RP*2. Мост питается напряжением 12 В от понижающего трансформатора и выпрямителя, собранного на диодах *VD1-VD4*. Если вес груза меньше предельно допустимого, мост разбалансирован, и через обмотку поляризованного реле *КР* в выходной диагонали моста протекает ток такого направления, что контакт *КР* в цепи обмотки реле времени *КТ1* замыкается. . Срабатывает реле времени *КТ*1, загорается зленная лампа *HL*1, отключается реле времени *КТ*2, с задержкой времени включается промежуточное реле *К* и замыкает цепь контактора подъема груза.

При превышении предельно допустимого веса мост тоже разбалансирован, но направление тока через обмотку КР меняется на противоположное. Это приводит к отключению реле *КТ*1.Гаснет лампа *HL*1, с задержкой во времени включается реле времени *КТ*2, загорается красная лампа *HL*2. Реле *К* отключается и снимает напряжение с крана.

# ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

## 6.1. Инженерный анализ автоматического контроля и управления технологическим процессом

В процессе инженерного анализа и проектирования систем автоматики руководствуются современными ГОСТами и применяют структурные и функциональные схемы автоматизации, электрические принципиальные и монтажные схемы. Функциональная схема автоматизации предназначена для отображения технических решений по автоматизации. Она является одним из основных проектных документов и средством общения технологов со специалистами по механизации и автоматизации строительного производства. При разработке функциональных схем автоматизации определяют:

1) основные принципы контроля и управления технологическим процессом;

2) места установки датчиков и исполнительных механизмов на технологическом оборудовании;

3) приборы систем автоматизации;

4) функциональные связи приборов систем автоматизации;

5) виды энергии для передачи информации между приборами и исполнительными механизмами;

6) размещение приборов систем автоматики.

7) метод контроля и законы управления по любому из параметров технологического процесса.

8) средства автоматической защиты и блокировки схем управления.

Функциональные схемы строят на базе технологических схем, отображающих материальные потоки, энергетические ресурсы и используемое оборудование. На функциональных схемах выделяют следующие элементы систем автоматизации:

1) первичный измерительный преобразователь (датчик);

2) преобразователь;

3) вторичный измерительный прибор;

4) регулятор;

5) исполнительный механизм;

6) регулирующий орган.

## 6.2. Автоматизация тепловой обработки железобетонных изделий в пропарочных камерах

Автоматизация ямных пропарочных камер

Тепловлажностная обработка (ТВО) свежеотформованных бетонных изделий в ямной камере осуществляется паром (паровоздушной смесью). Камера оснащена шторами, регистрами и линиями подачи пара. Изделия загружаются в камеру, в которой поддерживается давление в 2-3 атм. В камере образуется паровоздушная смесь. Режим термообработки включает: период подъема температуры с заданной скоростью, период изотермической выдержки и период охлаждения с требуемой скоростью. В камере осуществляется программное регулирование температуры.

Формулировка задач автоматизации. При автоматизации ТВО в ямных камерах необходимо решать следующие задачи: 1) программное регулирование температуры паровоздушной смеси путем соответствующего изменения расхода пара.2) управление вентилятором в период охлаждения; 3) измерение и регулирование давления пара в паровой магистрали; 4) измерение расхода и количества пара с помощью расходомера и счетчиков. 5) дистанционный контроль температуры в камере; 6) возможность управления процессом ТВО как в автоматическом, так и в ручном режиме.

Современная система автоматизации ямной камеры рассмотрена в ГЛАВЕ 7.

## Автоматизация щелевых пропарочных камер

Размеры щелевых пропарочных камер весьма внушительны: они достигают 80-120 м в длину, ширина их составляет несколько метров. Камеры углублены в землю, изделия в камеру загружаются с помощью крана, устанавливаются на вагонетки и вагонетки в течение 8-10 часов проходят путь от начала до конца камеры. В процессе движения вагонетки проходят 3 зоны: зону подъема температуры, зону изотермической выдержки и зону охлаждения. Контроль и регулирование температуры осуществляются с помощью большого числа медных термометров сопротивления и многоточечного электронного автоматического моста. Этот мост связан с релейным блоком. В случае отклонения температуры от заданной в каком-то месте камеры происходит воздействие на регулирующий орган, подающий пар к этой области камеры.

## Микропроцессорная система управления тепловлажностной обработкой изделий

Рассмотрим микропроцессорную систему, разработанную С.Д. Бушуевым и В.С. Михайловым [8].

Микропроцессорная система управления позволяет обслуживать до 16 пропарочных камер и представляет локальную сеть микроконтроллеров, построенных на базе однокристальных ЭВМ серии КР1816 и на базе микроЭВМ на микропроцессоре серии К580.

Центральная микроЭВМ обеспечивает анализ работы и текущего состояния любой пропарочной камеры, обработку показаний технологических процессов по требованию оператора и передачу данных, характеризующих ТВО, к ЭВМ высшего уровня. Однокристальные ЭВМ КР1816ВЕ48 осуществляют управление локальными технологическими процессами на основе анализа текущего состояния и планируемого графика хода ТВО и индикации режима реализации алгоритмов управления. Для обеспечения высокой надежности СУ любая из ЭВМ может работать в режиме локального управления и размещена в непосредственной близости от датчиков и исполнительных механизмов. Пульт управления содержит кнопку включения, кнопки начальной установки и переключатель, определяющий время выдержки отформованного изделия для ТВО. На пульт управления выведены светодиоды, индицирующие наличие напряжения питания (+5В), режимы нагрева и изотермической выдержки, включения исполнительного механизма. В пульт вмонтирован малогабаритный динамик, обеспечивающий звуковую индикацию режима работы ЭВМ и правильности ее функционирования. Пыле- и влагозащищенное исполнение микропроцессорной системы, а также стабильность работы в температур-

ном диапазоне от -10 °С до +80 °С позволяет установить ее в непосредственной близости от объекта управления.

## 6.3. Автоматизация бетоносмесительного узла (БСУ)

В бетоносмесительных цехах заводов сборного железобетона используется дистанционное или автоматическое управление электроприводами механизмов и автоматический контроль отдельных технологических параметров. Главными задачами являются автоматизация контроля загрузки материалов в расходные бункеры, автоматизация процессов дозирования и управление работой смесителя. Степень автоматизации может быть различной: от местного и дистанционного управления механизмами и сигнализации о состоянии их работы до полной автоматизации, включающей контроль и программное управление всеми операциями приготовления бетонной смеси.

Анализ технологических процессов. Приготовление бетонной смеси включает в себя операции подготовки материалов, их дозирование и перемешивание в бетоносмесителях. Цемент из силосов подается в расходные бункеры с помощью пневмотранспорта. Заполнители подаются в секции расходных емкостей при помощи наклонного ленточного конвейера со склада заполнителей. Отдозированные компоненты направляются в приемную воронку и затем в тот или иной смеситель. Из смесителя готовая бетонная смесь поступает в бункер выдачи бетона, из которого выгружается в транспортное средство или направляется в формовочный цех. Для обеспечения оптимального протекания процесса необходимо выполнить ряд задач: 1) обеспечить готовность расходных емкостей надбункерного отделения к принятию расходных материалов. Для этого затворы расходных емкостей должны быть установлены в положение «закрыто». Исполнительные механизмы должны быть готовы для загрузки пустого силоса цемента и расходных бункеров заполнителей; 2) обеспечить загрузку расходных емкостей надбункерного отделения. Загрузка силосов и отсеков заполнителей осуществляется до верхнего уровня, определяемого датчиками верхнего уровня *LE*; 3) осуществить загрузку дозаторов и т.д. Подробнее эти процессы описаны в ГЛАВЕ 7.

### Автоматизация процессов дозирования

В производстве бетонных смесей применяются дозаторы порционного (дискретного) действия и дозаторы непрерывного действия (транспортеры). Рассмотрим работу схемы дозатора дискретного действия (рис. 6.1).

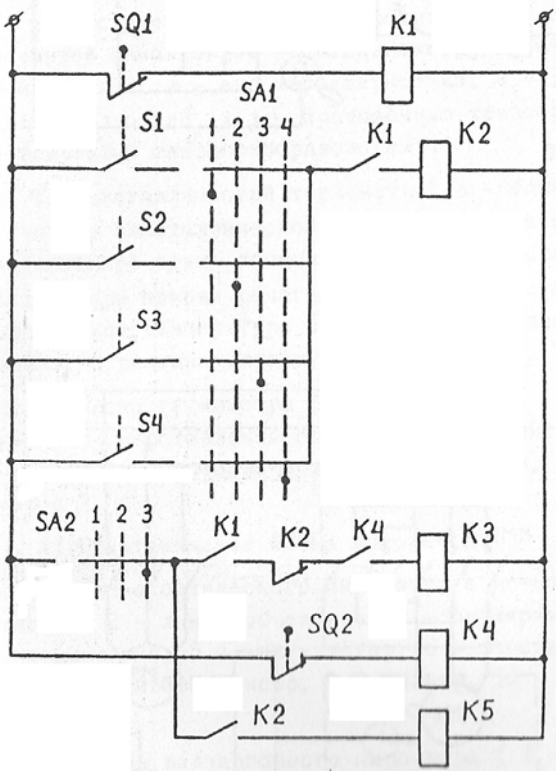



**Рис. 6.1. Электрическая схема автоматического порционного дозатора**

Если данный материал участвует в образовании смеси, то трехпозиционный переключатель SA2 ставится в положение 3. Положение переключателя SA1 определяет заданную дозу данного материала. Если выпускной затвор дозатора закрыт, то контакт конечного выключателя SQ1 замкнут, реле К1 включено. Питание подается на соленоид открытия впускного затвора К3. Когда этот затвор полностью открывается, размыкается контакт конечного выключателя SQ2, отключается реле К4 и соленоид открытия К3. Начинается поступление материала в дозатор. Стрелка циферблатного указателя перемещается и поочередно замыкает контакты S1 – S4. При достижении заданного веса напряжение подается на реле К2, и включается цепь соленоида закрытия К5 впускного затвора.

Дозатор инертных с фотоэлектрическим управлением (рис. 6.2)

Материалы в весовой бункер дозатора подаются с помощью вибропитателя, расположенного под расходным бункером. Установка веса дозируемого материала производится с помощью фотоэлемента на шкале с циферблатным указателем. На стрелке циферблатного указателя укрепляется флажок. Управление вибропитателем осуществляется с помощью магнитных пускателей КМ1 и КМ2. При нажатии кнопки SB1 срабатывает пускатель КМ1, что обеспечивает максимальную скорость подачи материала. При достижении грубого веса с недовесом флажок пересекает луч света от

осветительной лампы к фотоэлементу – фоторезистору. Сопротивление последнего резко возрастает, в результате зажигается тиратрон (трехэлектродная газонаполненная лампа ) и срабатывает реле К. Отключается пускатель КМ1, включается пускатель КМ2. Только часть напряжения сети поступает теперь на обмотки вибропитателя. Питатель переходит в режим досыпки, который продолжается, пока флажок не выйдет из-под луча света. После этого тиратрон гаснет и разрывает цепь управления.

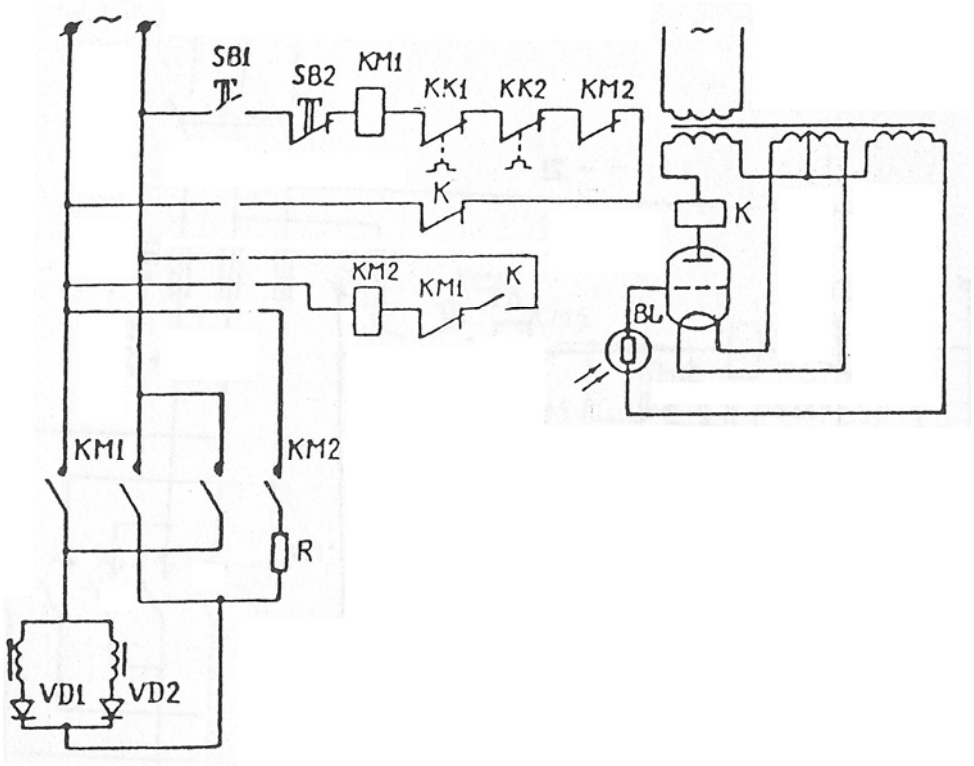



**Рис. 6.2 Схема автоматического дозатора инертных с фотоэлектрическим управлением**

Дозатор непрерывного действия (рис. 6.3)

С выходным валом вариатора, соединенного с ленточным транспортером, связан тахогенератор BR. Выходное напряжение U тахогенератора фиксирует (отражает) скорость движения ленты транспортера. Заданная производительность дозатора определяется напряжением $U_0$, которое снимается с потенциометра RP задатчика. Разность напряжений $\Delta U = U - U_0$ подается на вход электронного регулятора ЭР, к выходу которого подключены обмотки КМ1 и КМ2 реверсивного магнитного пускателя. В зависимости от знака $\Delta U$ срабатывает либо пускатель КМ1, либо пускатель КМ2, включается двигатель исполнительного механизма М1, изменяется передаточное отношение вариатора. Это приводит к изменению скорости движения ленты.

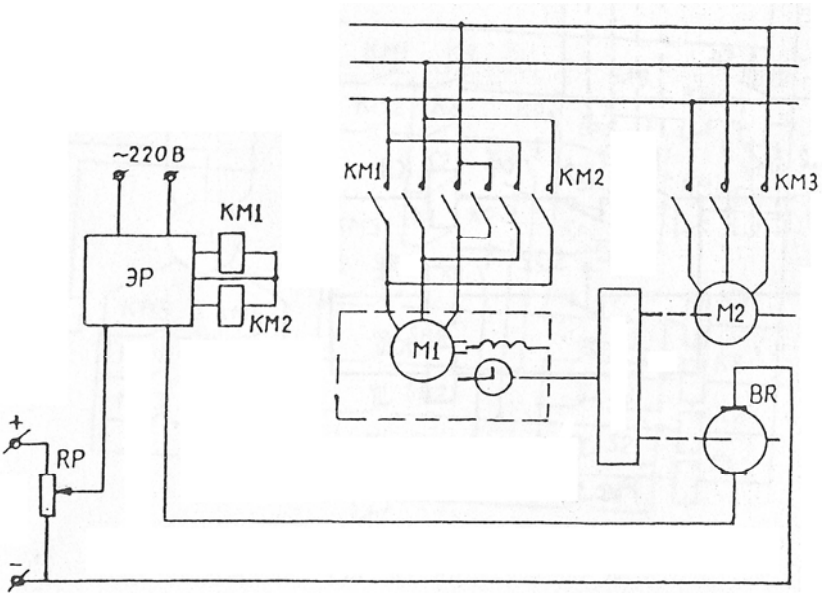



**Рис. 6.3. Схема регулирования скорости ленты автоматического дозатора непрерывного действия С-633Д**

## Бетонный завод-автомат

В нашей стране работают бетонные заводы-автоматы производительностью 30-60 м$^3$/ч с выдачей смеси по весу. Ниже описывается работа одного из таких заводов.

Управление всеми процессами производится с помощью дозаторов непрерывного действия. Заводы могут изготавливать большое число марок бетонной и растворной смесей. Перемешивание смеси осуществляется в двухвальном смесителе принудительного действия.

Управление работой завода и контроль за всем процессом может осуществляться одним человеком с центрального пульта.

Принципиальная электрическая схема завода-автомата приведена на рис. 6.4. Схема работает следующим образом.

При включении рубильника SF1 питание подается на электродвигатели приводов дозаторов, бетоносмесителей и транспортных средств. Выключателем SA2 питание подается на схему автоматики.

При наезде машины на автомобильные весы его передние и задние колеса замыкают конечные выключатели SQ1 и SQ2, соответственно. Если водитель поставит машину неправильно, то выключатели не замкнутся, и завод работать не будет. При задании рецептуры смеси замыкаются контакты SQ3.

При этом ток пойдет по цепи: от одного полюса трансформатора T1 через конечные выключатели SQ1-SQ3, сопротивление R1, обмотку реле K1 и сигнальную лампу HL1 к другому полюсу трансформатора.

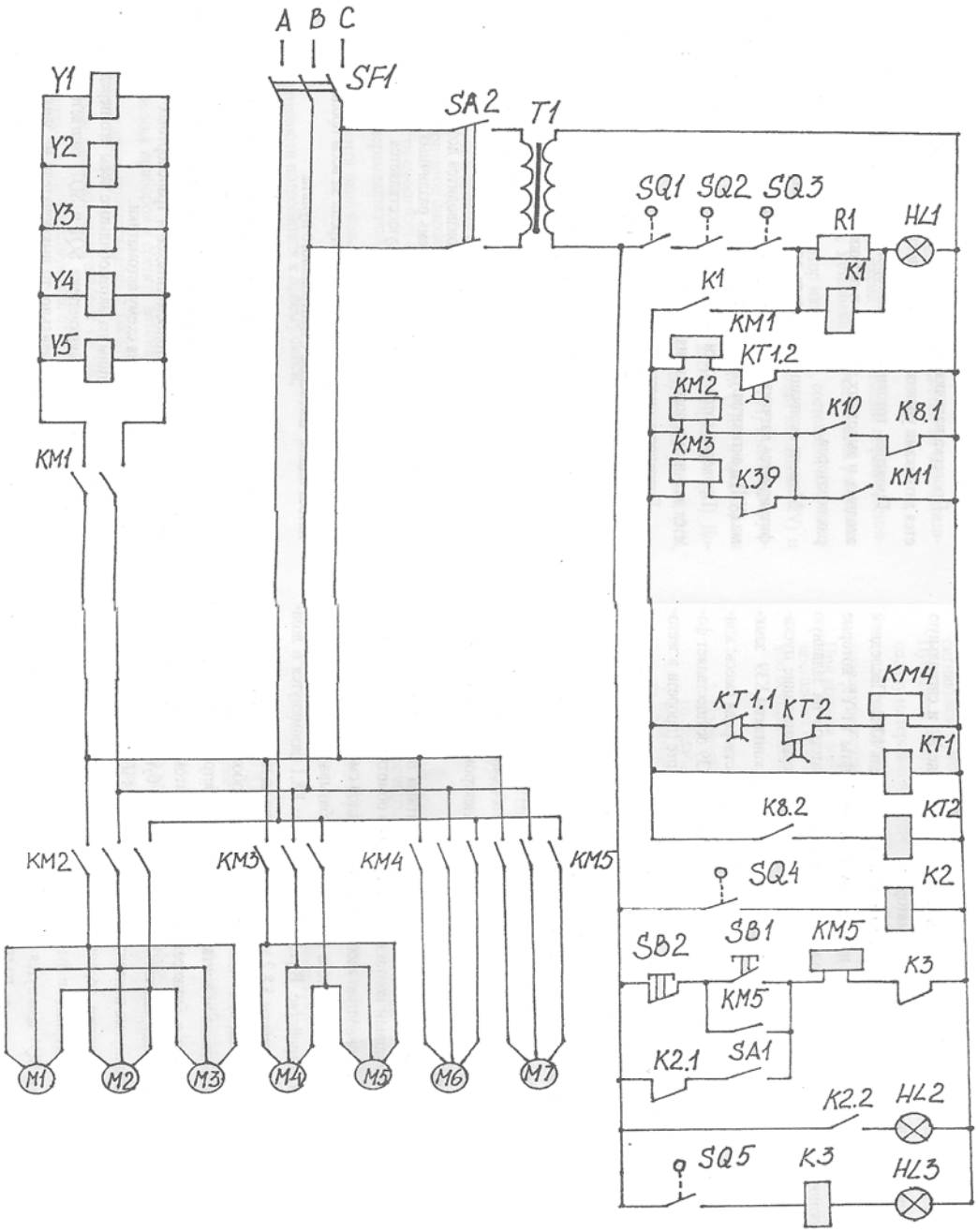



**Рис. 6.4.Принципиальная электрическая схема бетонного завода-автомата**

Реле К1, сработав, подает питание на обмотку пускателя КМ1. Пускатель КМ1, срабатывая, подает питание на электромагнитные муфты Y1-Y5, которые отключают дозаторы от их приводов для подстройки дозаторов на заданную производительность. Замыкание контактов КМ1 вызывает срабатывание пускателей КМ2 и КМ3 (если приготавливается бетонная смесь – контакты К39 замкнуты) или только пускателя КМ2 (если приготавливается растворная смесь: контакты К39 разомкнуты). Управление контактами К39 осуществляет фотореле К39 (на схеме не показано) в зависимости от заданной рецептуры.

Пускатели КМ2 и КМ3 включают приводы дозаторов (электродвигатели, редукторы, вариаторы), и происходит подстройка дозаторов на заданную производительность в соответствии с рецептурой смеси. После замыкания контактов К1 начинает работать реле КТ1, отсчитывающее время, необходимое для настройки дозаторов. После его срабатывания замыкаются контакты КТ1.1, через пускатель КМ4 включается смеситель, а контакты КТ1.2 размыкаются, что приводит к обесточиванию электромагнитных муфт – в результате начинают работать дозаторы.

Размыкание контактов КМ1, через которые запитаны пускатели дозаторов, компенсируется замыканием контактов реле К10 (его обмотка на схеме не показана), следящего за готовностью весов к приему бетонной смеси.

При приближении веса замеса к заданному срабатывает реле К8, установленное на весовом устройстве. В результате контакты К8.1 разомкнутся, и дозаторы остановятся, а контакты К8.2 замкнутся, поставив на питание реле времени КТ2. Оно, отсчитав время, необходимое для полного освобождения смесителя от бетонной смеси, размыканием контактов КТ2 отключит бетоносмеситель.

Уровень материала в бункерах поддерживается автоматически. В начале смены оператор замыкает контакты ключа SA1. Если в бункере материала нет, ток пойдет через замкнутые контакты К2.1, пускатель КМ5 и контакты К3. Пускатель КМ5 включит двигатель подачи соответствующего компонента.

Когда уровень материала в бункере станет выше указателя нижнего уровня УУН, его контакты SQ4 замкнутся и сработает реле К2. В результате контакты К2.1 разомкнутся, но пускатель КМ5 не обесточится, а останется запитанным через свои блок-контакты.

Замыкание контактов К2.2 вызовет загорание лампочки HL2 на пульте оператора, сигнализируя о наличии материала в данном бункере.

При полном заполнении бункера сработает указатель верхнего уровня УУВ. Замыкание его контактов SQ5 вызовет срабатывание реле К3, загорание сигнальной лампы HL3 на пульте оператора и размыкание контактов К3.1. Пускатель КМ5, обесточиваясь, разомкнет свои контакты КМ5 и остановит подачу материала в бункер.

С расходом материала из бункера разомкнутся контакты SQ5, что не вызовет включения контактора КМ5, т.к. контакты К2.1 остаются разомкнутыми. При полном опорожнении бункера разомкнутся контакты SQ4, что вызовет замыкание контактов К2.1 и включение двигателя подачи материала. Аналогично осуществляется управление загрузкой других бункеров.

Более современные автоматизированные системы управления бетонными заводами рассмотрены в ГЛАВЕ 7.

# ГЛАВА 7. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ

В данной главе рассматриваются современные технологии автоматизации, применяющиеся на цементных и бетонных заводах, в процессах тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий, производства кирпича на керамических заводах и т.д. Эти технологии были разработаны в последние годы, они связаны с применением современной вычислительной техники, контроллеров и микропроцессоров.

## 7.1. Автоматизированная система контроля уровня и массы цемента в силосах готовой продукции

Современный цементный завод представляет собой сложный комплекс оборудования и технологий, обеспечивающий переработку сырьевых материалов (известняков, мела и др.) в цемент различных видов и марок.

В цементной промышленности автоматизация осуществляется в широких масштабах и предусматривает технологический контроль и автоматическое регулирование параметров, дистанционное управление механизмами и сигнализацию, обеспечивая стабильную работу агрегатов. Однако, несмотря на высокую степень автоматизации в отрасли, до настоящего времени контроль уровня цемента в силосах готовой продукции часто осуществляется с помощью обычной верёвки. При этом значения уровня получаются сильно зависящими от места проведения измерения и многих субъективных факторов [13].

Сложность автоматизации измерений связана с тем, что цементные силосы – это бетонные конструкции высотой 27-30 метров и диаметром 10-12 метров, каждый силос вмещает до 4000 тонн продукта, а засыпаемый цемент имеет температуру до 100…120°С. В таких условиях измерение уровня практически исключает применение любых датчиков, контактирующих с продуктом, а также инфракрасных и ультразвуковых датчиков.

### Программно-технические средства, структура и особенности системы

С 2000 года ООО «Предприятие КОНТАКТ-1» осуществляет выпуск радиоволновых уровнемеров БАРС 322И. Приборы хорошо зарекомендовали себя при решении задач бесконтактного измерения уровня сыпучих сред (цемента, извести, песка, щебня, руды, шихты, угля).

При этом обеспечивается высокая надёжность и стабильность показаний в диапазоне от 0 до 30 м с погрешностью ±5 см независимо от воздействий дестабилизирующих факторов (широкий диапазон температур, агрессивный характер измеряемой среды, запылённость). Приборы могут работать как автономно, так и в составе АСУ ТП. Одним из примеров применения уровнемеров семейства БАРС в составе системы управления является их использование в АСУ ТП цеха приема угля обогатительной фабрики «Сибирь» [14].

На базе радиоволновых датчиков уровня БАРС 322И была разработана и успешно внедряется автоматизированная система АСК «Цемент-Завод»[13,14]. Структурная схема системы приведена на рис. 7.1.

В системе задействованы необходимые технические средства и программное обеспечение.

Технические средства:

- датчики уровня БАРС 322И (до 48 шт.);
- блок питания БП-240 (1 шт.) или БП-120 (до 2 шт.);
- блок сбора и обработки данных Б1БАРС 322 (до 2 шт.);
- преобразователь интерфейсов ADAM-4561 (1 шт.).

Программное обеспечение:

- сервер опроса приборов;
- клиентское приложение;
- сервер базы данных MySQL.

Датчики уровня БАРС 322И устанавливаются на цементных силосах. Приборы питаются напряжением +20 В от блока питания БП-240, который изготовлен из модулей питания Siemens Logo!Power (24В/2,5А), размещённых в шкафу CONCEPTLINE 400×400×220 мм фирмы Schroff. Частотные сигналы от датчиков поступают на блок сбора и обработки данных Б1БАРС 322, который построен на базе следующих изделий фирмы Fastwel: модуля микроконтроллера CPU1885BS, модулей ввода сигналов TBI24/0C-3 и модулей вывода дискретных сигналов TBI-0/24C. Блок снабжён 16-кнопочной пылевлагозащищённой клавиатурой FK-3 (тоже Fastwel) и двухстрочным индикатором PC1602L (Powertip).

Блок Б1-БАРС 322 обеспечивает выполнение следующих функций:

- приём частотных сигналов от датчиков БАРС 322И (до 24 шт.);
- пересчёт значений частоты в значения уровня по калибровочным точкам;
- вычисление объёма продукта по вводимым тарировочным таблицам;
- ведение архива (240 записей с заданным периодом);
- ведение журнала событий;
- отработка до двух уставок уровня по каждому каналу с формированием выходного сигнала «открытый коллектор» при их срабатывании;
- обмен данными с ПЭВМ по интерфейсу RS-485 (протокол ModBus RTU).

Программное обеспечение для блока выполнено на языке Borland C++ 5.02.

Блоки Б1-БАРС 322 поддерживают работоспособность системы при отсутствии ПЭВМ. Блоки Б1-БАРС 322 объединяются по интерфейсу RS-485 и через преобразователь ADAM-4561 (Advantech) подключаются к АРМ оператора. Протокол ModBus RTU даёт возможность при необходимости подключать блоки сбора и обработки данных к большинству SCADA-систем.

На АРМ оператора могут быть установлены как все программы системы, так и отдельные части программного обеспечения (сервер опроса, клиентское приложение).

Ниже перечислены функции основных частей программного обеспечения.

Функции сервера опроса приборов (PlantServer.exe):

- опрос блоков Б1-БАРС 322;
- пересчёт значений уровня цемента в значения массы по тарировочным таблицам;
- сохранение данных по уровню и массе цемента в архиве;
- изменение марки цемента в силосе; ввод уставок для каждого силоса.

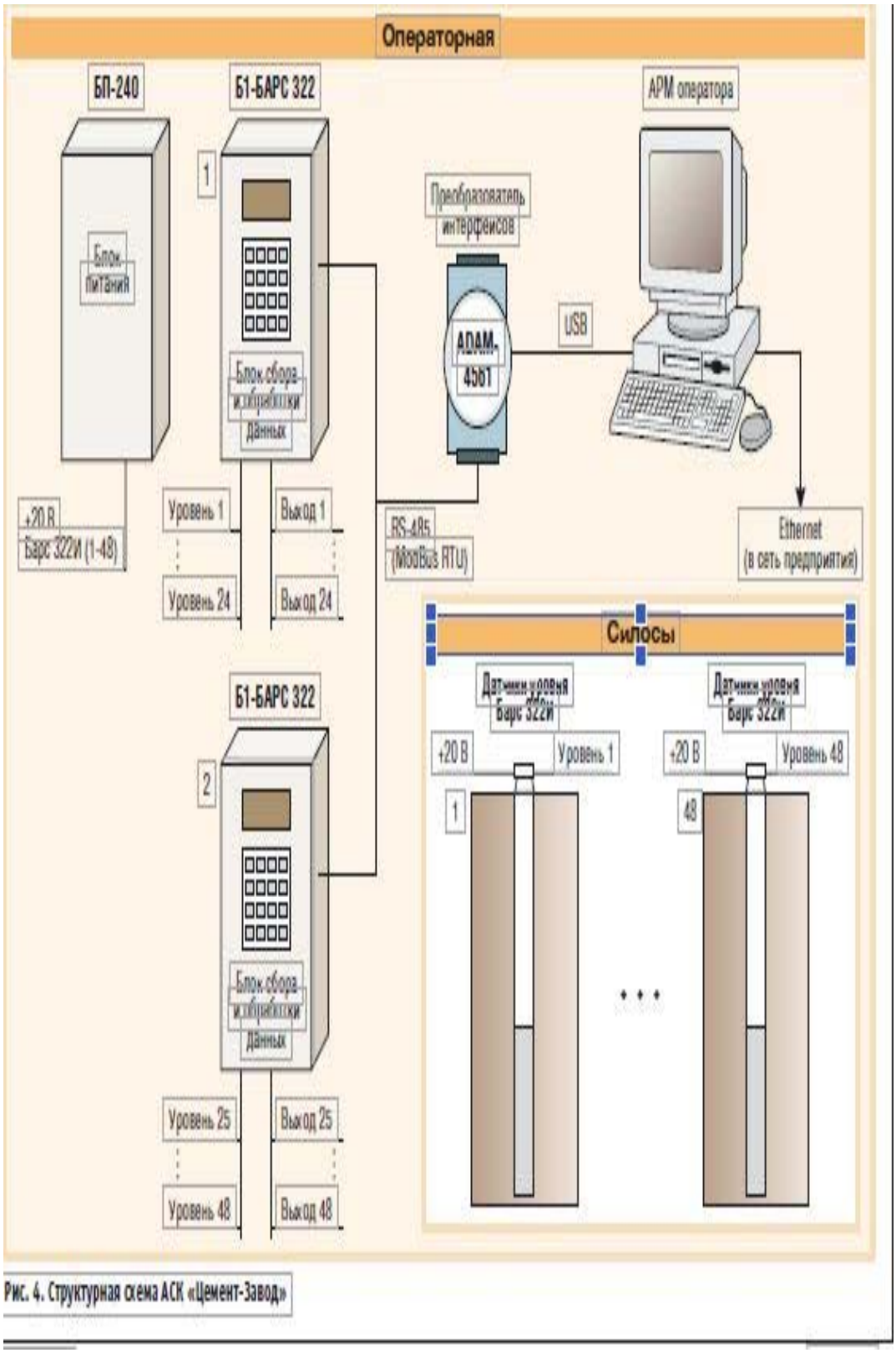



Рис. 4. Структурная схема АСК «Цемент-Завод»

**Рис. 7.1. Структурная схема АСК «Цемент-Завод»**

Функции клиентского приложения:

- отображение текущих и архивных значений уровня и массы цемента;
- просмотр журнала событий;
- создание и печать отчётов на основе текущей и архивной информации.

Функции сервера базы данных MySQL:

- ввод, коррекция и хранение таблиц, содержащих параметры настройки системы, тарировочные таблицы, журнал событий, текущие и архивные значения уровня и массы цемента;
- регистрация и проверка прав доступа пользователей к системе;
- получение информации от сервера опроса приборов;
- предоставление информации клиентским приложениям, установленным на различных компьютерах.

Программное обеспечение сервера опроса и клиентского приложения выполнено на языке Borland Delphi 6.

Главной особенностью данной системы является то, что она может настраиваться для каждого конкретного цементного завода. При настройке вводится название силосов, осуществляется привязка к входам блоков Б1БАРС 322, вводятся геометрические размеры силосов. Вычисление массы продукта для каждого силоса осуществляется по тарировочным таблицам, которые вводятся для различных марок цемента. В системе предусмотрен ввод уставок уровня, при включении которых производится запись в журнал событий, цветовая и звуковая сигнализация.

Использование СУБД MySQL 3.23.51 для хранения архивов даёт возможность при необходимости экспортировать данные в АСУ предпри-

ятия. Одной из причин выбора именно этой СУБД стало стремление уменьшить стоимость ПО системы, так как MySQL распространяется бесплатно.

В настоящее время происходит активное внедрение АСК «Цемент-Завод» на цементных заводах [13]. Внедрение системы обеспечило учёт готовой продукции, оптимизацию загрузки силосов, отображение архивной и текущей информации на компьютерах в сети предприятия, передачу данных в АСУ предприятия. Исключаются случаи хищения продукта и нарушения технологии при приёме/отпуске продукта.

Использование приборов БАРС 322И для цементного производства не ограничивается силосами готовой продукции. Были разработаны и внедрены на цементных заводах автоматизированные системы управления работой шлам-бассейнов, где эти радиоволновые уровнемеры применяются для контроля уровня шлама [13].

## 7.2. Автоматизированная система управления (АСУ) пневмотранспортом сыпучих продуктов

Рассматриваемая в этом разделе система описана в работе [15]. Одно из условий повышения эффективности промышленного производства в строительной индустрии — это развитие и совершенствование оборудования для погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ с сыпучими материалами. Для транспортировки таких материалов в настоящее время широкое распространение получили пневматические устройства, которые имеют преимущества перед другими видами транспортного оборудования [15]. Рассмотрим некоторые из них.

Пневмотранспортные установки обеспечивают возможность перемещения сыпучих материалов по сложной траектории, забор материала из различных средств доставки и труднодоступных мест, выдачу его в различных точках, надёжную защиту от атмосферных воздействий и необходимые санитарно-гигиенические условия труда обслуживающего персонала. Кроме того, обеспечивается защита самой окружающей среды от распыления транспортируемого материала.

Пневмотранспортные установки требуют относительно малых площадей для оборудования и трубопроводов, которые могут быть проложены с учётом любых местных условий производства, в том числе и в труднодоступных местах. Это оборудование отличается простотой эксплуатации, лёгкостью управления, возможностью автоматизации процессов транспортирования и использования дистанционного управления.

Применение пневмотранспорта особенно важно для улучшения условий труда на предприятиях строительной индустрии, при производстве цемента, гипса, глинозёма, на мельничных комбинатах и др. Широкое внедрение пневмотранспорта для пылящих материалов имеет большое социальное значение и направлено на резкое уменьшение опасности роста массовых профзаболеваний [15].

К недостаткам пневмотранспорта относят сравнительно высокий удельный расход электроэнергии на тонну перемещаемого материала и износ трубопроводов и других частей установок, соприкасающихся с транспортируемым материалом. Однако эти недостатки сейчас успешно нивелируются за счёт внедрения новых эффективных технологий и современного оборудования.

Развитие пневматического транспорта и его усовершенствование в России идёт в следующих направлениях:

- полная автоматизация работы пневмотранспортных установок;

- создание наиболее эффективных способов транспортирования с целью увеличения экономичности и надёжности пневмотранспорта;

- расширение номенклатуры выпускаемых установок;

- совершенствование существующих и разработка новых систем и методов расчёта пневмотранспорта и его элементов.

В настоящее время имеются реализованные и оправдавшие себя в эксплуатации пневмотранспортные системы в различных отраслях народного хозяйства, которые представляют интерес как примеры возможных

схем пневматического транспортирования отдельных видов сыпучих грузов.

Описываемая в данном разделе система автоматизированного управления пневмотранспортом предназначена для управления работой устройств перекачки сыпучих продуктов между приёмными ёмкостями, ёмкостями хранения и ёмкостями отгрузки. Система обеспечивает уменьшение расхода электроэнергии за счёт снижения времени работы оборудования вхолостую. Последовательность включения и отключения устройств, а также встроенные блокировки уменьшают вероятность закупорки пневмопровода продуктом. Также обеспечено снижение влияния человеческого фактора.

На предприятиях «КОНТАКТ-1» (г. Рязань) и «МЕТАЛТЕК» (г. Москва) осуществляется совместная разработка и ввод в эксплуатацию таких систем. Для примера рассмотрим систему, внедрённую в городе Алма-Ате [15].

Характеристика объекта автоматизации

Объект автоматизации — пневмотранспортная система для сыпучих продуктов. Продуктом является цемент. Технологическая схема объекта автоматизации представлена на рис. 7.2.

Перекачка производится из приёмного силоса Е-1, который имеет два выпускных конуса, в ёмкости хранения Е-2...Е-7, откуда продукт перекачивается в ёмкости отгрузки Е-8, Е-9, Е-10.

Перекачка производится насосами Н1, Н2 из силоса Е-1 и насосами Н3...Н8 из соответствующих силосов хранения Е-2...Е-7. Сжатый воздух в насосы подаётся из трёх магистралей. Магистраль 1 обслуживает насосы Н1 и Н2, магистраль 2 — насосы Н3, Н4 и Н5, магистраль 3 — насосы Н6, Н7 и Н8. Для управления подачей воздуха в насосы используются электромагнитные клапаны К-1...К-11. Клапаны К-1 и К-3 работают в противофазе (на сброс воздуха) с аналогичными клапанами К-2 и К-4, установленными непосредственно на насосах Н1 и Н2. На входе силосов Е-2...Е-10 установлены вибраторы В-1...В-9 для встряхивания фильтров.

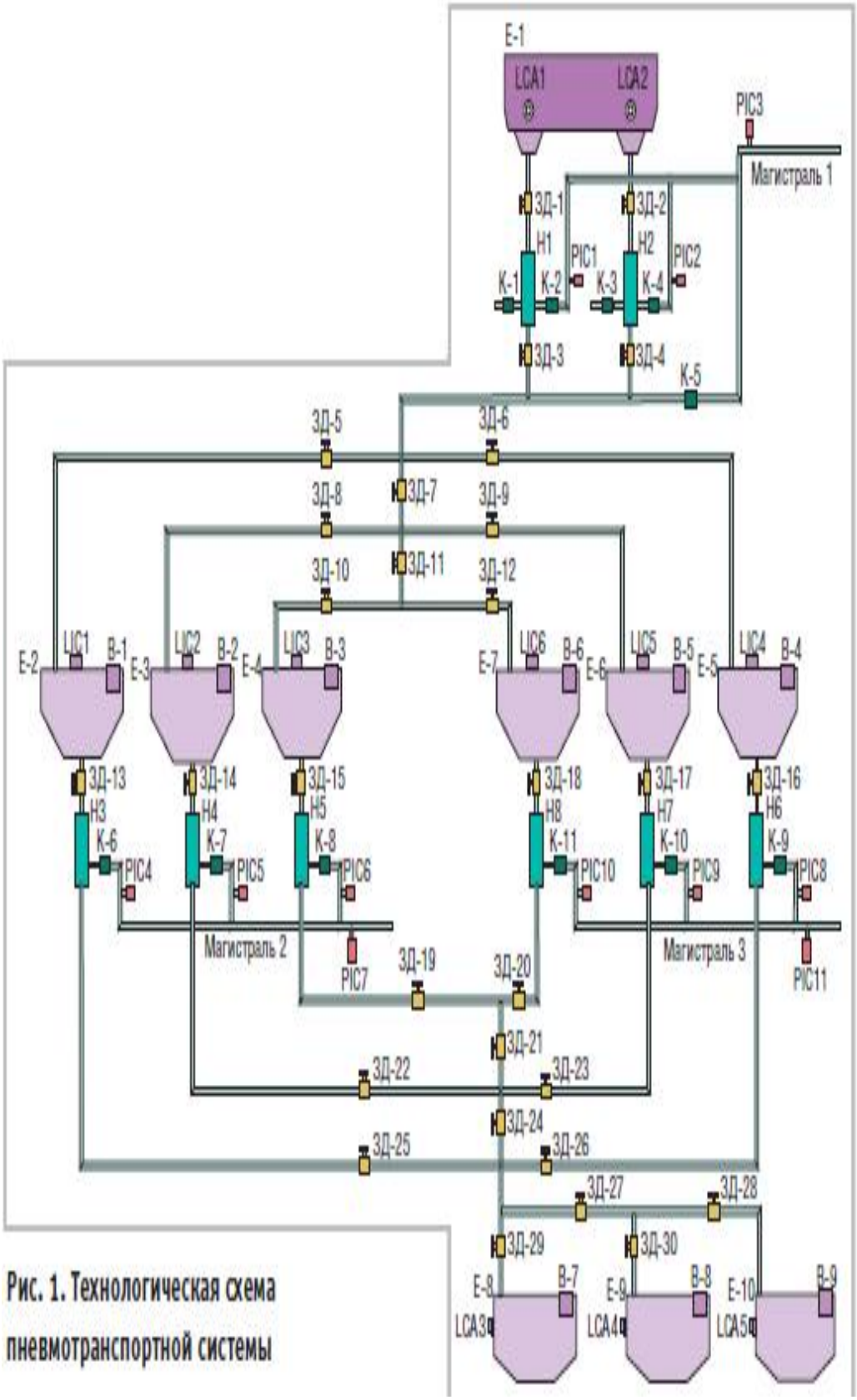



**Рис. 7.2. Технологическая схема пневмотранспортной системы**

В системе используются электрические клапаны EVXP 2390 (клапаны тарельчатого типа с катушкой 220 В переменного тока) и вибраторы WA1030 180W. Пневмотранспорт отделён от ёмкостей посредством шиберных задвижек, которые позволяют производить выбор силосов для загрузки и выгрузки. В системе применены следующие шиберные задвижки:

ЗД-1 и ЗД-2 — задвижки ГРАНВЭЛ ЗПСС (дисковые поворотные с пневмоприводом, механическим датчиком положения и распределителем в виде соленоидного клапана с катушкой 220 В переменного тока);

ЗД-3...ЗД-30 — задвижки ОРБИ- НОКС EX-01-D/A (ножевые с пневмоприводом, механическим датчиком положения и распределителем в виде соленоидного клапана с катушкой 220 В переменного тока). Наряду с исполнительными устройствами пневмотранспортная система использует три вида датчиков: датчики уровня LIC1... LIC6, сигнализаторы уровня LCA1...LCA5 и датчики давления PIC1...PIC11.

Структура системы управления и назначение ее частей

Структурная схема системы автоматизированного управления пневмотранспортом представлена на рис. 7.3. Реализация базовых принципов размещения аппаратуры в условиях конкретного производственного объекта привела к разделу оборудования данной системы на три части, установленные в подвальной части хоппероприёмника, на складе цемента и в операторной.

Подвальная часть хоппероприёмника

В подвальной части хоппероприёмника находятся ёмкость Е-1, насосы Н1 и Н2, шиберные задвижки ЗД-1...ЗД-4, электрические клапаны К-1...К-5, датчики нижнего уровня LCA1, LCA2, датчики давления PIC1...PIC3, а также вторичные приборы — местные блоки МБ-24/0(1) и МБ-0/24, шкаф контроля и управления ШКУ-01.

Шкаф ШКУ-01

Шкаф ШКУ-01 построен на базе конструктива ZPAS серии SWN (800x800x300 мм) с использованием кнопок, переключателей и индикаторов Schneider Electric со степенью защиты IP54. Для коммутации используются реле Omron MY4 с клеммными блоками WAGO. Питание устройств обеспечивают блоки Siemens LOGO!Power (24 В/ 2,5 А).

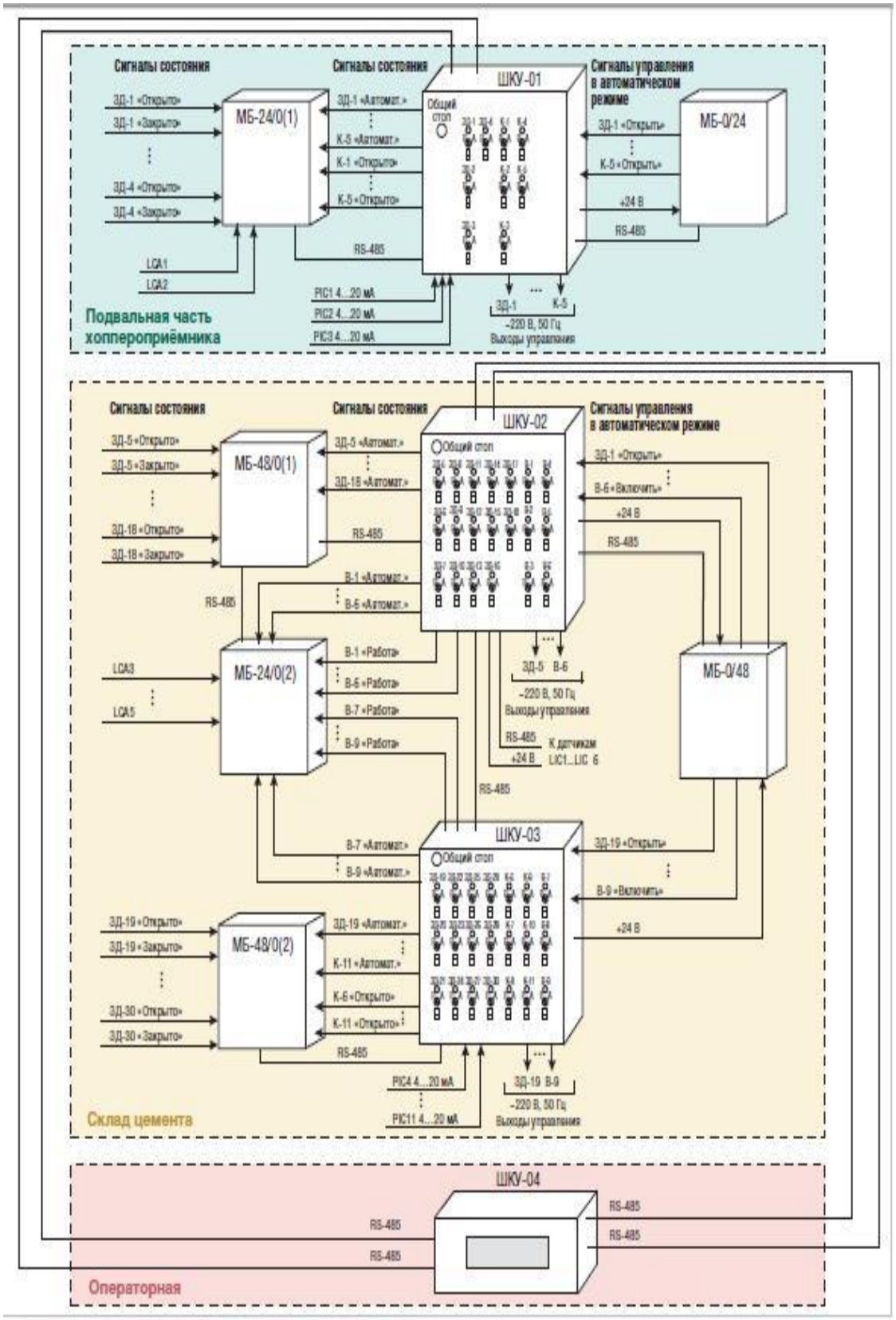



**Рис. 7.3. Структурная схема системы управления пневмотранспортом**

Шкаф служит для выполнения следующих функций:

- выбор режима работы для каждого исполнительного устройства;

- индикация состояния «Работа» для каждого исполнительного устройства;

- формирование выходных управляющих сигналов 220 В (50 Гц) на исполнительные устройства в ручном (от кнопок) и автоматическом (по командам с МБ-0/24) режимах;

- приём данных с датчиков давления и передача их по интерфейсу RS-485 в шкаф ШКУ-04 в операторную;

- передача сигнала режима работы для каждого исполнительного устройства на входы местного блока МБ- 24/0(1).

Местный блок МБ-24/0(1)

Местный блок МБ-24/0(1) служит для выполнения следующих функций:

- приём сигналов состояния «Открыто»/«Закрыто» от шиберных задвижек;

- приём сигналов «Открыто» клапанов К-1...К-5 с выходов реле управления шкафа ШКУ-01;

- приём сигналов от датчиков LCA1, LCA2;

- приём сигналов режима работы для каждого исполнительного устройства от шкафа ШКУ-01;

- передача состояния всех входов на ШКУ-04 по интерфейсу RS-485.

Все местные блоки системы, включая блок МБ-24/0(1), строятся на базе модулей CPU188-5LC, TBI-24/0C-1, TBI-0/24C, TBCOM фирмы FASTWEL и блоков питания Siemens LOGO!Power (24 В/ 1,3 А и 5В/3 А). Для устанавливаемого в местные блоки микроконтроллера CPU188-5LC была разработана специальная программа на языке СИ. Оборудование каждого местного блока размещено в отдельном шкафу ZPAS с габаритными размерами 400x400x200 мм.

В местных блоках МБ-24/0(1)/(2) и МБ-48/0(1)/(2) осуществляются сбор данных с дискретных входов через модули TBI-24/0C-1 и их передача по запросу на компьютер по интерфейсу RS-485. В местных блоках МБ-

0/24 и МБ-0/48 по командам с компьютера, передаваемым по интерфейсу RS-485, формируются выходные дискретные сигналы типа «открытый коллектор» и выдаются через модули TBI-0/24C.

Местный блок МБ-0/24 служит для выполнения следующих функций:

- формирование сигналов типа «открытый коллектор» по командам со шкафа ШКУ-04, передаваемым через интерфейс RS-485;

- передача сигналов типа «открытый коллектор» на шкаф ШКУ-01 для управления исполнительными устройствами ЗД-1...ЗД-4 и К-1...К-5 в автоматическом режиме.

Датчики нижнего уровня

В качестве датчиков нижнего уровня LCA1 и LCA2 в ёмкости Е-1 используются сигнализаторы уровня СУ- 503.1П с защитными стаканами. Эти датчики подключаются к местному блоку МБ-24/0(1) по трёхпроводной схеме и обеспечивают формирование выходного дискретного сигнала, когда чувствительный элемент датчика выходит из толщи цемента. Применяемые датчики отличаются высокой стабильностью при работе в условиях запылённости.

Датчики давления

В качестве датчиков давления PIC1... PIC3 используются датчики 7MF1563-5CA00 (Siemens), имеющие двухпроводную схему подключения, выходной сигнал 4...20 мА и погрешность измерения не более 0,25% от полной шкалы. Эти датчики предназначены для эксплуатации в тяжёлых условиях. Их отличают высокая стабильность и надёжность работы.

Склад цемента

На складе цемента находятся ёмкости Е-2...Е-7, насосы Н3...Н8, шиберные задвижки ЗД-5...ЗД-30, электрические клапаны К-6...К-11, вибраторы В-1...В-9, датчики уровня LIC1...LIC6, датчики давления PIC4. PIC11, а также вторичные приборы — местные блоки МБ-48/0(1), МБ-48/0(2), МБ-24/0(2), МБ-0/48, шкафы контроля и управления ШКУ-02 и ШКУ-03.

Кроме того, в это помещение приходят сигналы от датчиков верхнего уровня LCA3, LCA4, LCA5 в ёмкостях Е-8, Е-9, Е-10. В качестве датчиков верхнего уровня тоже используются сигнализаторы СУ503.1П с за-

щитными стаканами, настраиваемые на срабатывание при достижении цементом чувствительного элемента.

Датчики давления здесь аналогичны рассмотренным ранее.

Шкаф ШКУ-02

Шкаф ШКУ-02 строится из комплектующих, аналогичных применяемым в шкафу ШКУ-01, и служит для выполнения следующих функций:

- выбор режима работы для каждого исполнительного устройства;

- индикация состояния «Работа» для каждого исполнительного устройства;

- формирование выходных управляющих сигналов 220 В (50 Гц) на исполнительные устройства в ручном (от кнопок) и автоматическом (по командам с МБ-0/48) режимах;

- электрическая блокировка исполнительных устройств согласно алгоритму работы системы;

- передача сигнала режима работы для каждого исполнительного устройства на входы местных блоков МБ- 48/0(1) (задвижки) и МБ-24/0(2) (вибраторы);

- питание датчиков уровня LIC1...LIC6;

- подключение датчиков LIC1...LIC6 по интерфейсу RS-485 и передача данных в шкаф ШКУ-04.

Шкаф ШКУ-03

Шкаф ШКУ-03 служит для выполнения следующих функций:

- выбор режима, индикация, формирование сигналов и блокировка, идентичные первым четырём из списка функций ШКУ-02;

- передача сигнала режима работы для каждого исполнительного устройства на входы местных блоков МБ- 48/0(2) (задвижки и клапаны) и МБ- 24/0(2) (вибраторы);

- приём данных с датчиков давления и передача их по интерфейсу RS-485 в шкаф ШКУ-04 в операторную.

Местный блок МБ-48/0(1)

Местный блок МБ-48/0(1) служит для выполнения следующих функций:

- приём сигналов состояния «Открыто»/«Закрыто» от шиберных задвижек ЗД-5...ЗД-18;

- приём сигналов режима работы для задвижек ЗД-5...ЗД-18 от шкафа ШКУ-02;

- передача состояния всех входов на ШКУ-04 по интерфейсу RS-485.

Местный блок МБ-48/0(2)

Местный блок МБ-48/0(2) служит для выполнения следующих функций:

- приём сигналов состояния «Открыто»/«Закрыто» от шиберных задвижек ЗД-19...ЗД-30;

- приём сигналов «Открыто» для клапанов К-6...К-11 с выходов реле управления шкафа ШКУ-03;

- приём сигналов режима работы для задвижек ЗД-19...ЗД-30 и клапанов К-6...К-11 от шкафа ШКУ-03;

- передача состояния всех входов в ШКУ-04 по интерфейсу RS-485.

Местный блок МБ-24/0(2)

Местный блок МБ-24/0(2) служит для выполнения следующих функций:

- приём сигналов состояния «Работа» для вибраторов В-1...В-6 с выходов реле управления шкафа ШКУ-02 и вибраторов В-7...В-9 с выходов реле управления шкафа ШКУ-03;

- приём сигналов режима работы для вибраторов В-1...В-6 от шкафа ШКУ-02 и вибраторов В-7...В-9 от шкафа ШКУ-03;

- приём сигналов от датчиков LCA3... LCA5;

- передача состояния всех входов на ШКУ-04 по интерфейсу RS-485.

Местный блок МБ-0/48

Местный блок МБ-0/48 служит для выполнения следующих функций:

- формирование сигналов типа «открытый коллектор» по командам от шкафа ШКУ-04, передаваемым через интерфейс RS-485;

- передача сигналов типа «открытый коллектор» в шкафы ШКУ-02 и ШКУ-03 для управления исполнительными устройствами в автоматическом режиме.

Датчики уровня

В качестве датчиков уровня LIC1... LIC6 в системе используются радиоволновые уровнемеры БАРС 322МИ (производство «КОНТАКТ-1»). Датчики обеспечивают бесконтактное измерение уровня цемента и передачу информации по интерфейсу RS-485.

Операторная (шкаф ШКУ-04)

В операторной устанавливается шкаф контроля и управления ШКУ-04. Шкаф ШКУ-04 имеет в своём составе промышленный панельный компьютер iR0B0-5052T с ПО АСУ «Пневмотранспорт» и обеспечивает выполнение следующих функций:

- приём данных по интерфейсу RS-485 отШКУ-01, ШКУ-02, ШКУ-03, МБ- 24/0(1), МБ-24/0(2), МБ-48/0(1), МБ-48/0(2), датчиков LIC1..LIC6 (данные от этих датчиков поступают в ШКУ-04 через ШКУ-02);

- выполнение операций по приёму/отпуску продукта согласно алгоритму работы системы;

- передача команд управления на МБ-0/24, МБ-0/48 по интерфейсу RS-485.

Для сигналов RS-485 шкафы ШКУ-01, ШКУ-02 и ШКУ-03 фактически являются только распределительными коробками. В шкафах ШКУ-01 и ШКУ-03 установлены модули АЦП I-7017RC, на входы которых поступают токовые сигналы от датчиков давления. Эти модули объединяются в одну линию интерфейса RS-485 с местными блоками, принимающими дискретные сигналы, и датчиками уровня, образуя линию контроля. Наряду с ней в системе можно выделить линию управления, к которой подключаются местные блоки с выходными дискретными сигналами. Обе интер-

фейсные линии соединены с портами промышленного компьютера шкафа ШКУ-04: линия контроля — с COM1, линия управления — с COM2.

Наличие шкафов управления ШКУ-01, ШКУ-02, ШКУ-03 обеспечивает возможность перевода любого из исполнительных устройств в ручной режим работы для выполнения ремонтных и регламентных работ. В шкафах расположены силовые реле для управления исполнительными механизмами. При этом управление системой в автоматическом режиме осуществляется напряжением +24 В.

Контроль перепада давления в магистралях 1, 2, 3 и на входе клапанов К-1, К-2, К-6...К-11 даёт возможность определять состояние этих клапанов для отработки блокировок, что создаёт условия для уменьшения вероятности закупорки пневмопровода транспортируемым продуктом.

Программное обеспечение АСУ «Пневмотранспорт»

Программное обеспечение системы управления устанавливается на компьютере шкафа ШКУ-04 и обеспечивает:

- сбор информации о состоянии пневмотранспортной системы;

- наглядное предоставление информации оператору;

- управление состоянием устройств согласно выбору оператора (оператор на мониторе выбирает, из какой ёмкости в какую осуществляется перекачка, затем система работает в автоматическом режиме);

- реализацию блокировок, предусмотренных системой;

- ведение журнала событий по аварийным ситуациям.

Программное обеспечение разработано на языке Delphi. Его функционирование осуществляется под управлением операционной системы Windows семейства NT/2K/XP.

На рис. 7.4 показан внешний вид основного экрана системы. Особенностью программы является то, что она разработана для сенсорного экрана и позволяет оператору быстро формировать маршруты работы пневмотранспорта путем нажатия на изображения соответствующих силосов.

Разработанная авторами система позволяет быстро и качественно управлять технологическим процессом загрузки/выгрузки силосов с использованием пневмотранспорта на современных строительных производствах.

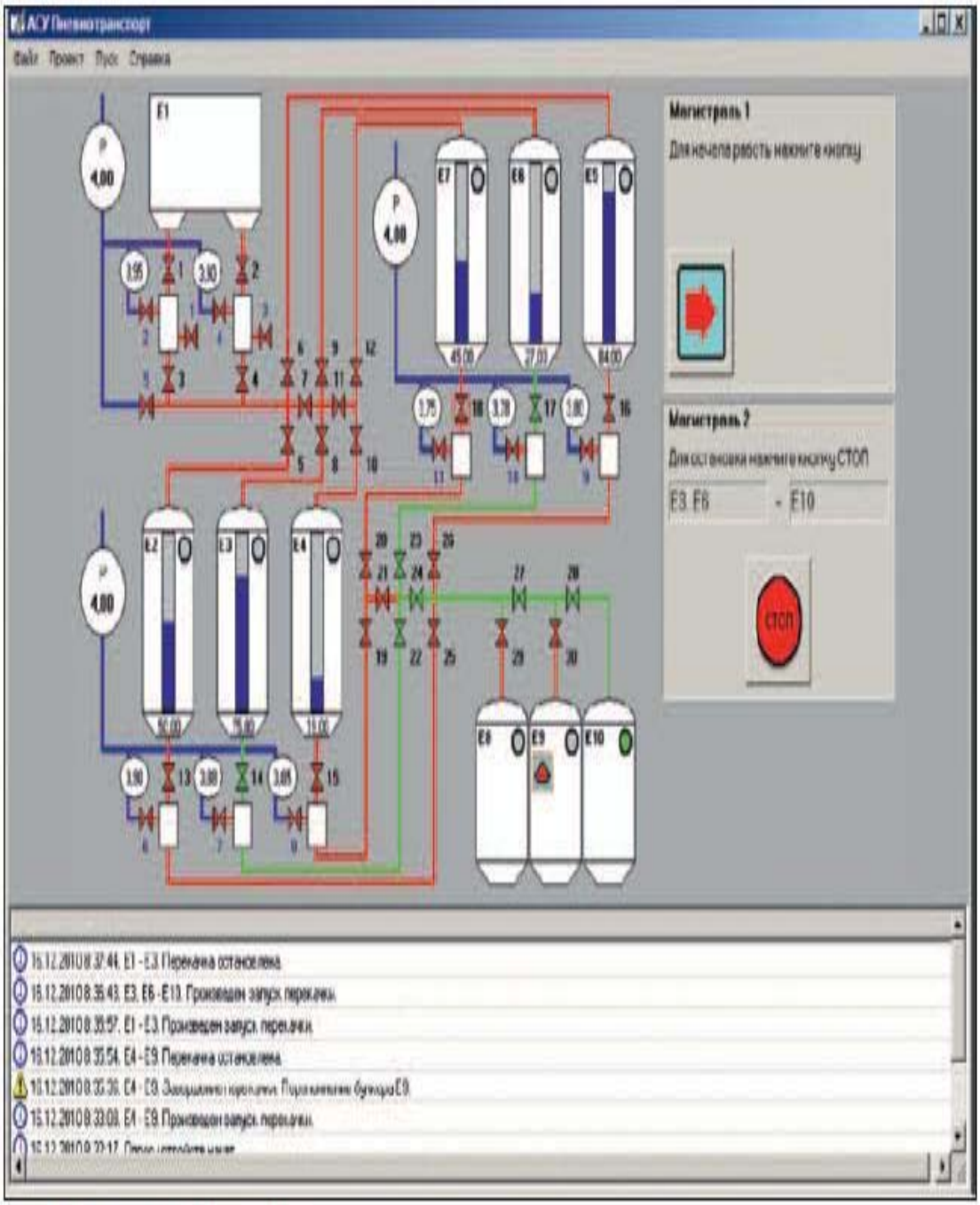



**Рис. 7.4. Основной экран системы**

Модульная конструкция даёт возможность легко компоновать и монтировать оборудование системы при различных конфигурациях объектов автоматизации.

Используемые при разработке шкафов комплектующие обеспечивают надёжную и безотказную работу системы в условиях повышенной запылённости строительных производств. Первая из таких внедрённых систем уже проработала больше трёх лет, и за время её эксплуатации не было ни одного отказа оборудования [15].

## 7.3. АСУ бетоносмесительной установкой

В этом разделе говорится об автоматизированной системе управления бетоносмесительной установкой [16]. Описаны её функциональные возможности и особенности пользовательского интерфейса. Представленные аппаратно-программные решения обеспечивают высокую надёжность системы и позволяют расширить её функции до уровня управления всем оборудованием бетоносмесительного узла.

В промышленности стройматериалов до сих пор имеется огромное количество бетоносмесительных узлов (БСУ), построенных еще по проектам советского времени. Как правило, в них используется типовой комплект оборудования: подсистема подачи материалов в расходные бункеры БСУ, дозаторы компонентов смеси, смесители и подсистема доставки смеси. Для управления этим оборудованием применяется релейная схема с ручным управлением или, в лучшем случае, полуавтоматическая пневматическая система «Цикл БС». Оба варианта устройств управления морально и физически устарели и дают высокую погрешность дозирования, в большинстве случаев компенсируемую только мастерством оператора. Всё это приводит к колебаниям состава смеси и, как следствие, к увеличению расхода цемента [16].

Для модернизации БСУ ЗАО «Железобетон», г. Ярославль, была создана система управления [16]. Она построена на базе современной вычислительной техники и к настоящему времени внедрена на нескольких заводах Ярославля и Коломны.

<u>Назначение системы</u>

БСУ, как правило, включает:

- склад заполнителей;
- склад цемента;
- подсистему подачи заполнителей и цемента в расходные бункеры;
- одну или две бетоносмесительные установки;
- транспортную подсистему доставки смеси потребителям.

Описываемая система предназначена для автоматического управлением оборудованием бетоносмесительной установки и ведения учёта результатов её работы. В расширенной комплектации эта система управле-

ния позволяет автоматизировать работу и всего другого оборудования БСУ.

В состав оборудования бетоносмесительной установки входят:

- 6 расходных бункеров заполнителей (щебня, песка, керамзита);
- 2 расходных бункера цемента;
- 2 расходных бака воды;
- 2 расходных бака добавок;
- 6 вибраторов на бункерах заполнителей;
- 2 вибратора на бункерах цемента;
- 6 дозаторов;
- 4 вибратора на дозаторах заполнителей и цемента;
- 1 шибер заполнителей;
- 2 смесителя.

Система изготовлена в исполнении УХЛ, категория размещения 4 по ГОСТ 15150-69 и должна эксплуатироваться в закрытых отапливаемых помещениях при температуре 0...+45°С (—20...+45°С для первичных датчиков). Воздействие механических факторов допускается в соответствии с ГОСТ 17516-72 для группы М3.

Электропитание устройств системы управления осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В +10-15% с частотой 50 Гц. Показатели качества электроэнергии должны отвечать требованиям ГОСТ 13109-97.

Основные технические данные и характеристики

- Система управления обеспечивает работу бетоносмесительной установки в двух режимах:
    - автоматическом — при управлении с компьютера;
    - ручном — при управлении с пульта ручного управления и визуальном наблюдении работы по мнемосхеме на мониторе;

- автоматическое управление весодозирующим и смесительным оборудованием по заявке на приготовление бетонной смеси (количество рецептов бетонной смеси до 1000, объём смеси по одной заявке до 10 $м^3$);
- автоматическую адаптацию к скоростям истечения материалов и задержкам срабатывания затворов;
- возможность экономии материалов за счёт работы в зоне отрицательных допусков дозирования;
- ввод данных о влажности исходных компонентов бетонной смеси и использование их в расчётах;
- управление нагревом воды в расходных баках до температуры 10...80.°С с погрешностью поддержания температуры ±3°С;
- контроль температуры бетонной смеси;
- контроль тока, потребляемого двигателями смесителей;
- автоматический учёт расхода материалов, выхода бетона и выполненных заявок;
- подготовку отчётов;
- диагностику состояния оборудования;
- блокировку работы исполнительных механизмов при возникновении аварийной ситуации;
- работу устройств в составе локальной сети.

Порядок функционирования системы

Система управления бетоносмесительной установки, обеспечивая работу весодозирующего и смесительного оборудования в автоматическом режиме, требует от оператора только ввести заявку на приготовление бетонной смеси с клавиатуры компьютера. Система рассчитывает параметры замеса и общее количество замесов, учитывает влажность компонентов, контролирует выполненные необходимых условий для начала технологического процесса, таких как наличие компонентов в расходных бункерах, исправность оборудования и т.д. Затем открываются затворы расходных бункеров, и производится дозирование компонентов бетонной смеси по весу. Для дозирования керамзита, объёмный вес которого значительно колеблется, один из дозаторов оборудован также датчиком уровня заполне-

ния, что позволяет не только взвешивать, но и измерять объём компонента. После окончания процесса дозирования исходные компоненты из дозаторов перегружаются в смеситель, в котором производится перемешивание бетонной смеси, а затем выгрузка в транспорт.

Весь технологический процесс постоянно контролируется. При любых отклонениях его параметров или ошибках в работе оборудования система управления пытается самостоятельно решить возникшую проблему и только после нескольких неудачных попыток нормализовать ситуацию выдаёт сообщение об ошибке оператору.

После каждого замеса или после выполнения всей заявки система формирует и записывает соответствующие отчёты. Это позволяет вести полный учёт заявок, отгрузок потребителю, расхода компонентов и выхода бетона.

Система управления поддерживает в заданных пределах температуру горячей воды в расходных баках и выбирает для дозирования бак, температура воды в котором соответствует требованиям исполняемого рецепта на приготовление бетонной смеси.

Система способна работать как в автономном режиме, так и в составе локальной сети. Во втором случае сменное задание, рецепты, база данных и т.д. могут быть размещены на сетевом сервере. Функции оператора бетоносмесительной установки при этом могут быть либо незначительно ограничены, либо сведены только к контролю технологического процесса и действиям в аварийных ситуациях.

Программное обеспечение (ПО) системы управления имеет дружественный оператору пользовательский интерфейс. Все параметры технологического процесса выводятся на красочную мнемосхему в удобном для восприятия виде. Команды оператора вводятся через стандартную клавиатуру с использованием сравнительно небольшого количества легко запоминающихся клавиш; кроме того, разрешённые к использованию в конкретной ситуации клавиши всегда указываются в соответствующей строке подсказки.

ПО написано на языке C++ и работает в среде MS-DOS. Для удобства представления информации на мнемосхеме используется графический интерфейс с разрешением 800x600.

ПО системы можно условно разделить на несколько уровней.

- *Уровень непосредственного управления оборудованием.*

  Реализован в виде драйвера и обеспечивает цифровую фильтрацию и преобразование данных от различных датчиков в физические параметры (вес, объём, температура, ток, влажность, положение), а также выполнение элементарных команд («До-

зировать», «Выгрузить», «Выгрузить дозу», «Включить»/«Выключить», «Открыть»/«Закрыть» и т.д.).

- *Уровень управления технологическим процессом.*

  Реализован в главном модуле программы и обеспечивает управление бетоносмесительной установкой, визуализацию технологического процесса, работу с базой данных и т.д.

- *Сервисный уровень.*

  Реализован в виде отдельных модулей и обеспечивает:
  - техническое обслуживание системы, для чего в начале рабочей смены оператору выдаётся перечень регламентных работ, которые система рекомендует выполнить в течение смены;
  - диагностику состояния оборудования, для чего из базы данных выбираются все ошибки, возникшие в работе оборудования за указанный период, строится гистограмма ошибок, и на основе этих данных обслуживающий персонал имеет возможность произвести профилактический ремонт механизма, не дожидаясь его полного отказа;
  - возможность аттестации контрольной аппаратуры на основе поверки и настройки измерительных каналов.

Модульный принцип построения ПО системы позволяет изменять количество и тип дозаторов, датчиков и исполнительных механизмов без переделки программы. Для обучения операторов вне БСУ и для демонстрационных целей в ПО предусмотрен имитатор аварийных ситуаций.

Мнемосхема как зеркало технологического процесса

На мнемосхеме бетоносмесительной установки в режиме анимации отображаются изменения состояния оборудования, органов управления, выполнение отдельных операций, текущие значения параметров технологического процесса и т.д. Условные изображения расходных бункеров, компонентов бетонной смеси, а также баков воды и добавок на мнемосхеме снабжены надписями с наименованием соответствующего компонента бетонной смеси и закрашены цветом, близким к реальному цвету этого

компонента. Числа внутри изображений бункеров показывают влажность соответствующих компонентов в процентах (за исключением бункеров с керамзитом и цементом). На изображении пустого бункера никакие числа не высвечиваются, благодаря чему такой бункер легко идентифицируется. Изображения двух баков воды закрашены голубым цветом, и каждое из них содержит в своём поле по два числа, если соответствующий бак не пуст: верхнее число указывает заданную для автоматического поддержания температуру, а нижнее — текущую температуру воды. Если используются добавки, то на мнемосхеме изображение соответствующего бака тоже закрашено цветом содержимого и имеет надпись с наименованием добавки. Внизу изображений конусной части бункеров и сливных труб баков показаны затворы. Они открываются по команде на дозирование компонентов. Если при этом материал в бункере (баке) есть, то на мнемосхеме средствами анимации отображается процесс его высыпания (переливания) в дозатор и соответствующее изменение уровней наполнения.

Непосредственно под бункерами и баками на мнемосхеме изображаются дозаторы с номерами от 1 до 6. Изображение каждого дозатора включает столбчатый и цифровой индикаторы, показывающие степень его заполнения. В процессе дозирования и выгрузки в поле изображения каждого дозатора появляются три (или четыре) числа. Верхнее число показывает заданный вес или объем дозируемого компонента в килограммах или кубических дециметрах; среднее число отражает реально набранный вес или объем в тех же единицах измерения, а нижнее – относительную погрешность дозирования в процентах, Если дозатор имеет датчик влажности, то появляется четвертое число, показывающее измеренное значение влажности. Для дозаторов (1–3) на мнемосхеме средствами анимации показывается процесс высыпания материала. Дозаторы заполнителей имеют по одному выпускному затвору (рис. 7.5), и материал при высыпании из этих дозаторов подается в смеситель по шиберу, который переключается в одно из двух фиксированных положений. Дозаторы цемента, воды и добавок (4–6) имеют по два выпускных затвора, которые трубами соединены каждый со своим смесителем. Выпускные затворы открываются по команде загрузки компонентов в смеситель.

Ниже дозаторов на мнемосхеме показаны два смесителя, имеющих номера 1 и 2. Каждый смеситель имеет мотор, приводящий в движение ло-

пасти, и выпускной затвор для выгрузки смеси. На мнемосхеме средствами анимации показывается движение лопастей при включённом моторе.

В поле изображения смесителей высвечиваются следующие данные:

- номер заявки;
- номер рецепта;
- объём замеса ($м^3$);
- номер замеса/всего замесов;
- ток мотора смесителя (А);
- температура бетонной смеси (°С).

В нижней части изображения смесителя имеется линейный индикатор, показывающий, в зависимости от текущего режима, время перемешивания или время до окончания выгрузки.

Под каждым смесителем находится площадка выгрузки. В случае наличия транспорта под смесителем на мнемосхеме появляется изображение тележки, и при выгрузке, когда затвор смесителя открывается, средствами анимации отображается процесс высыпания бетонной смеси.

В правой верхней части мнемосхемы условно изображаются вентилятор, лопасти которого вращаются при включённой аспирации, и манометр давления воздуха в пневмосети. Если стрелка манометра находится в зелёном секторе шкалы, то давление воздуха в норме, если в красном — ниже нормы.

В самом низу мнемосхемы находятся панели, отражающие текущее состояние технологических процессов на линии каждого смесителя:

«Свободен» — линия свободна;

«Подготовка» — идёт подготовка оборудования к дозированию компонентов;

«Дозирование» — выполняется дозирование компонентов;

«Загрузка» — производится загрузка компонентов из дозаторов в смеситель;

«Перемешивание» — идёт перемешивание в смесителе; если заданное в рецепте время перемешивания вышло (линейный индикатор в поле смесителя полностью закрашен), то по команде начинается выгрузка (рядом с изображением бетоновоза появляется значок разрешения выгрузки);

«Выгрузка» — производится выгрузка бетонной смеси из смесителя;

«Отправка транспорта» — включается в последнем замесе выполняемой заявки на приготовление бетонной смеси, подаётся звонок для отъезда транспорта из-под смесителя;

«Выполнено» — технологический процесс завершен.

В правой нижней части мнемосхемы находится справочная панель, в которой указаны текущие дата и время, а также индикаторы выполнения заявки, наличия автотранспорта и состояния пульта ручного управления. Кроме мнемосхемы, на экране всегда присутствует окно главного меню программы управления бетоносмесительной установкой. При выборе пунктов главного меню открываются соответствующие окна, которые могут частично или полностью закрывать информацию из неактивных в данный момент ранее открытых окон.

**Рис. 7.5. Дозаторы заполнителей**

В окно в зависимости от его назначения выводятся данные, субменю или производится ввод данных. Ввод-вывод данных выполняется только в активном окне, которое отличается синим цветом заголовка. Каждое окно имеет рамку, заголовок, раскрывающий его назначение, и набор «горячих» клавиш управления окном.

При ошибках оборудования выполнение технологического процесса приостанавливается, на мнемосхеме значком показывается механизм, вызвавший ошибку, открывается окно ошибок и система предлагает оператору выбрать один из вариантов действий: повторить операцию, игнорировать сообщение и т.д. Окна с сообщениями об ошибках оформлены ярко-желтым цветом с красной рамкой и красным заголовком, что сделано специально для привлечения внимания оператора.

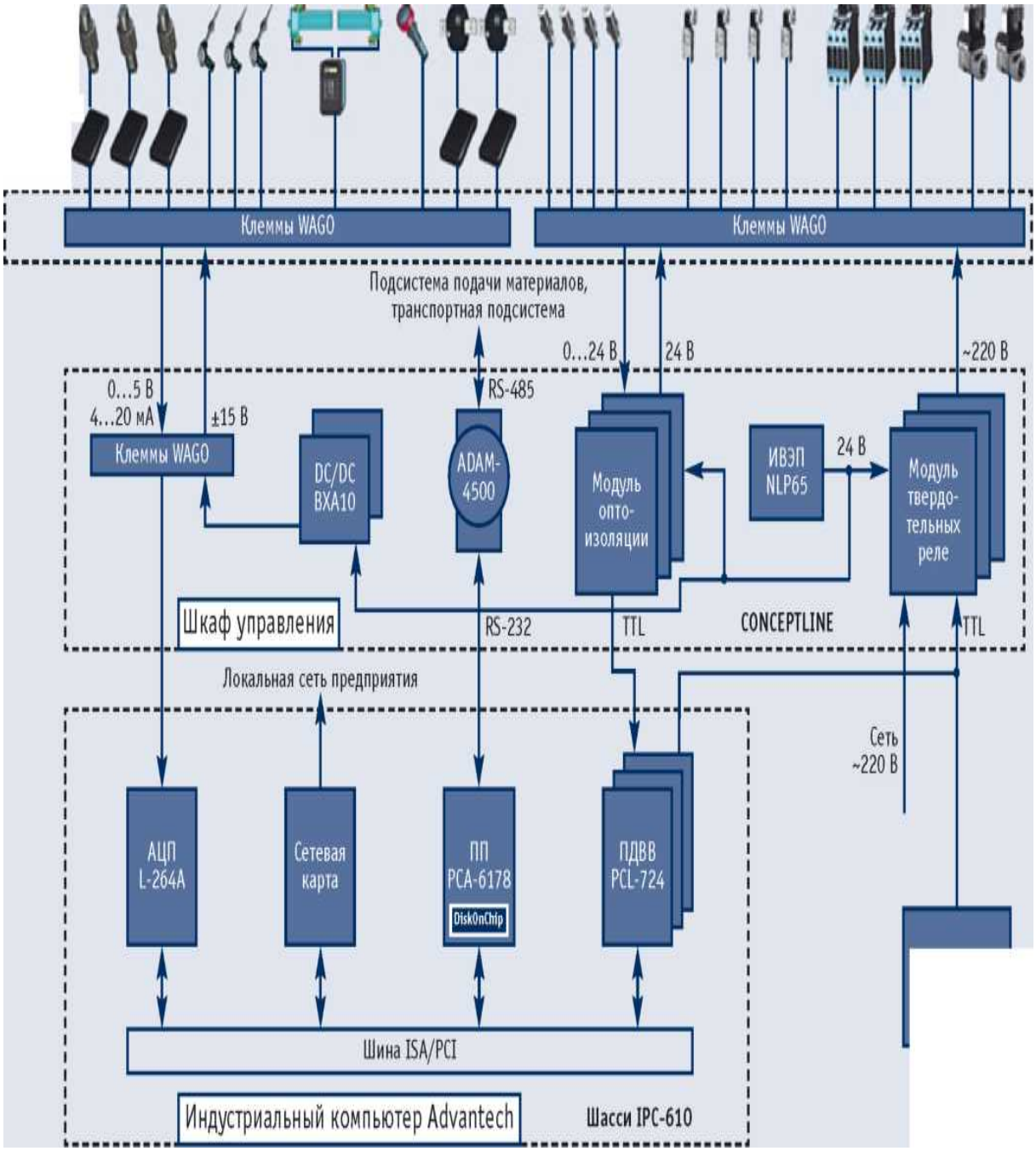



**Рис. 7.6. Структурная схема системы управления бетоносмесительной установкой**

При ошибках оборудования выполнение технологического процесса приостанавливается, на мнемосхеме значком показывается механизм, вызвавший ошибку, открывается окно ошибок и система предлагает оператору выбрать один из вариантов действий: повторить операцию, игнорировать сообщение и т.д. Окна с сообщениями об ошибках оформлены ярко-желтым цветом с красной рамкой и красным заголовком, что сделано специально для привлечения внимания оператора.

## Аппаратные средства системы

Структурная схема системы управления бетоносмесительной установкой представлена на рис. 7.6. Основу системы составляет индустриальный компьютер фирмы Advantech, выполненный на базе шасси IPC-610 и процессорной платы PCA-6178V, в котором установлены платы дискретного ввода-вывода PCL-724 (Advantech), плата АЦП L-264A (L-Card) и сетевая карта. Компьютер не имеет жесткого диска, вместо него используется DiskOnChip MD2202 (M-Systems) объёмом 32 Мбайт.

Компьютер соединен со шкафом управления, выполненным на базе конструктива CONCEPTLINE (Schroff) со степенью защиты IP66. В шкаф управления установлены блоки питания NLP65-7624 и BXA10-48D15 (ArtesynTechnologies), контроллер ADAM-4500 (Advantech) или I-7188 для управления подсистемой подачи материалов и транспортной подсистемой, модули твердотельных реле (Cosmo), клеммы WAGO. Для фиксации кабелей, подводимых через отверстия в стенках шкафа, и их герметизации используются кабельные вводы фирмы RST. Исполнение шкафа управления с учётом размещения индикатора, выключателя и кнопок на передней панели базового конструктива CONCEPT- LINE обеспечивает степень защиты IP53. Шкаф управления кабелями соединён с датчиками и исполнительными механизмами, для подключения которых в местах установки оборудования используются монтажные корпуса QLINE-D (Schroff) с установленными клеммами WAGO.

Для контроля положения исполнительных механизмов применены индуктивные датчики E2EGX5MB1 (Omron).

Каналы измерения веса дозаторов построены на основе тензорезисторных датчиков T2, S2 (Тензо-М) и нормирующих усилителей с выходным сигналом 0.5 В. Измерение объёма материала в дозаторе производится по показаниям ультразвукового датчика уровня заполнения (Siemens), которые компьютером пересчитываются в объём.

Канал измерения влажности использует СВЧ-влагомер Microradar MR113 с унифицированным выходным сигналом 4…20 мА. Такой же выход имеют медные термометры сопротивления ТСМУ-205 (Элемер) каналов измерения температуры.

Каждый канал измерения тока мотора смесителя имеет в своём составе трансформатор тока и нормирующий усилитель.

В системе предусмотрен пульт ручного управления исполнительными механизмами, который включается поворотом специального ключа. Дозирование компонентов с пульта разрешается компьютером после ввода

заявки на приготовление смеси. Переход на ручное управление автоматически учитывается системой.

К настоящему времени разработан расширенный вариант системы, который, кроме приготовления смеси, обеспечивает автоматическую подачу материалов в расходные бункеры БСУ, управление складом заполнителей и автоматическую доставку смеси потребителям. Расширенный вариант системы монтируется на Вологодском заводе железобетонных конструкций и строительных деталей [16].

### 7.4. АСУ ТП производства бетонных смесей

Данный раздел посвящен АСУ ТП [17] производства технологических бетонных смесей и товарного бетона на Тушинском заводе железобетонных конструкций ОАО ДСК-1 г. Москвы. Система была разработана сотрудниками компании «Элтикон», работающей на рынке автоматизации с 1991 года и имеющей свыше 200 введенных в эксплуатацию АСУ ТП.

Заказчиками «Элтикона» являются предприятия строительной индустрии и перерабатывающей промышленности более чем в 80 городах России, Белоруссии, Казахстана. В связи с многообразием решаемых задач автоматизации перед разработчиками встал вопрос о такой архитектуре аппаратно-программных комплексов, которая была бы одинаково оправдана для АСУ ТП различной программно-алгоритмической сложности и различной информационной ёмкости — от нескольких десятков до нескольких тысяч входных и выходных сигналов. Для успешного решения этой проблемы требуется [17]:

- минимальное количество уровней непосредственного цифрового управления (НЦУ), то есть отсутствие промежуточных узловых контроллеров в контуре НЦУ и минимальное количество вычислительных устройств (контроллеров) НЦУ вплоть до одного в системе без резервирования или до двух в системе с резервированием;

- возможность применения для НЦУ вычислительных устройств с различными ресурсами и от разных фирм-производителей без изменения среды разработки программного обеспечения (ПО); программируемые логические контроллеры (ПЛК) для этого подходят плохо, альтернатива — компьютеры и процессорные платы, со-

вместимые с IBM PC по операционным системам;

- распределённые устройства связи с объектом (УСО), поддерживающие единый протокол обмена данными с вычислительными устройствами НЦУ в реальном масштабе времени;

- произвольная и гибкая компоновка УСО без перенастройки системы и ПО, простота объединения УСО в сеть с вычислительными устройствами НЦУ;

- одинаковая среда разработки ПО супервизорного (диспетчерского) управления для задач и вычислительных систем различной сложности — от простой задачи для небольшой технологической линии с одним компьютером диспетчерского управления до пакета задач, например, для целого завода с вычислительным комплексом многоуровневого супервизорного управления технологическим процессом, планирования и подготовки производства, автоматизированной разработки и оптимизации технологических карт, ведения архива (базы данных) технологического процесса и т.д.

Реализация этого подхода сдерживалась до некоторых пор отсутствием необходимых УСО и стала возможной только в 2001 году с началом производства модулей серии СА «Композит» [17]. Сейчас аппаратно-программные комплексы всех АСУ ТП группы компаний «Элтикон» имеют достаточно простую архитектуру, особенно в части НЦУ: для каждого неделимого технологического участка (цеха, технологической линии и т.д.) имеется конструктивно обособленное вычислительное устройство управления технологическим процессом и распределённые УСО, поддерживающие прямой обмен данными с вычислительным устройством НЦУ в реальном масштабе времени.

Вычислительные устройства НЦУ традиционно комплектуются процессорными платами фирм Octagon Systems и Fastwel, а УСО — модулями серии СА «Композит» производства группы компаний «Элтикон».

Супервизорное (диспетчерское) управление может быть одно-, двух- или трёхуровневым в зависимости от иерархии привносимых в АСУ ТП организационно-управляющих функций. В качестве вычислительных устройств на всех уровнях супервизорного управления чаще всего применяются компьютеры производства фирмы Advantech.

На Тушинском заводе железобетонных конструкций ОАО ДСК-1 г. Москвы более двух лет работает АСУ ТП производства технологических бетонных смесей и товарного бетона.

Автоматизирован бетоносмесительный цех (БСЦ) из четырёх технологических линий. В состав оборудования БСЦ входят:

- шестнадцать расходных бункеров инертных компонентов;
- десять расходных бункеров цемента и сухих добавок;
- семь расходных ёмкостей жидких компонентов;
- двадцать три весовых дозатора (рис. 7.7);
- семь бетоносмесителей;
- транспортирующее оборудование отгрузки бетонных смесей в цех;

**Рис. 7.7. Дозаторное отделение бетоносмесительного цеха**

- формовки конструкций и товарного бетона на автотранспорт;
- система воздухоподготовки и аэрации цемента в расходных бункерах.

В процессе реализации проекта выполнены также реконструкция и переоснащение БСЦ [17]:

- изготовлены и смонтированы новые дозаторы жидких и сухих добавок;
- смонтирована система аэрации цемента;
- дозаторы цемента оборудованы современными шнековыми питателями;
- дозаторы жидких фракций оборудованы надёжными клапанами;
- расходные бункеры сыпучих компонентов и грузоприёмные устройства дозаторов оборудованы пневмомолотками;
- все дозаторы переведены на тензометрические системы взвешивания;
- дозаторы песочных фракций оборудованы влагомерами;
- расходные бункеры и баки оборудованы датчиками критических уровней;
- расходные баки воды оборудованы датчиками температуры (это позволяет осуществлять контролируемый нагрев воды).

В результате внедрения АСУ ТП решены следующие наиболее важные для заказчика задачи:

- одновременно с автоматизацией выполнена существенная реконструкция технологического оборудования и усовершенствована технологическая схема, что позволило повысить надёжность и точность функционирования оборудования, расширить номенклатуру выпускаемых смесей;
- повышено качество управления технологическим процессом за счёт оснащения оборудования цеха современными датчиками и контрольно-измерительными приборами;

- введена в эксплуатацию система управления, подтверждающая заявленные характеристики надёжности (взамен предшествующей системы на базе офисного компьютера десятилетней давности и периферийных устройств кустарного производства);

- достигнута предельная производительность цеха за счёт высокой степени автоматизации и конвейеризации технологического процесса;

- достигнута необходимая точность дозирования компонентов смесей для 100% замесов, что особенно важно при формовке конструкций больших объёмов, так как из-за брака в одном замесе бракуется конструкция целиком;

- исключены вмешательства в технологический процесс в режиме прямого ручного управления исполнительными механизмами (ручные пульты отсутствуют в системе принципиально); любые предусмотренные вмешательства, включая коррекции компонентного состава смесей «на ходу», осуществляются по директивам оператора в автоматическом режиме и регистрируются в архиве;

- улучшены условия труда практически всех работников цеха (это стало следствием «цепной реакции»: автоматизация+ одновременная реконструкция — полученный в результате автоматизации и реконструкции новый качественный уровень производства и т.д.)

- Основные характеристики описываемой системы управления, получившей название «Бетон-1РС/096», приведены в таблице 1. Структурная схема комплекса вычислительных средств АСУ ТП показана на рис. 7.8.

Функции и характеристики системы управления

Верхние уровни управления представлены в системе сервером и двумя равноценными взаимозаменяемыми операторскими станциями.

Сервер системы является одновременно автоматизированным рабочим местом (АРМ) начальника цеха или технолога, а также резервной операторской станцией.

На сервере установлена база данных, включающая в себя банк рецептов, контейнеры заказов и архив.

Таблица 7.1

**Основные характеристики системы управления «Бетон-IPC/096»**

| | |
|---|---|
| Количество автоматизированных рабочих мест (начальника цеха, технолога) | 1 |
| Количество операторских станций супервизорного управления | 2 |
| Количество вычислительных устройств непосредственного цифрового управления (по количеству линий) | 4 |
| Количество весоизмерительных каналов | 23 |
| Количество прочих измерительных каналов | 36 |
| Количество каналов ввода дискретных сигналов | 312 |
| Количество каналов вывода дискретных сигналов управления | 288 |
| Погрешность взвешивания материалов, не более | 0,05% от наибольшего предела дозирования |
| Погрешность измерения влажности материалов, не более | 0,5% абс. |
| Погрешность измерения температуры, не более | 1°С |
| Погрешность измерения силы переменного тока асинхронных двигателей, не более | 1% от предельного значения |
| Погрешность дозирования компонентов смесей во всех случаях, не более | 1% |
| Количество образцов в банке рецептов | До 500 |
| Количество наименований компонентов в одном рецепте | До 15 |
| Задаваемый порядок загрузки компонентов в смеситель | Произвольный |
| Количество одновременно обслуживаемых заказов | До 8 |
| Управление потоком заказов | Директивное* |
| Вмешательства в техпроцесс по инициативе оператора | Директивные* |
| Вмешательства в техпроцесс в нештатных и аварийных ситуациях | Директивные* |
| Глубина архива базы данных техпроцесса | 20 000 заказов |
| Режим работы | Непрерывный |
| Температура окружающего воздуха при эксплуатации (для оборудования в производственных помещениях) | −25…+60°С |
| Расчётный срок службы, не менее | 20 лет |

Банк рецептов рассчитан на 500 образцов. Каждый образец содержит наименования компонентов, значения требуемых доз компонентов в расчёте на 1 м$^3$, значения влажности сыпучих компонентов, при которых рас-

считывался рецепт, описание регламента загрузки-смешивания компонентов. В ряде случаев образец содержит и другие данные, относящиеся по смыслу к атрибутам рецепта. Редактирование образцов выполняется с помощью заранее составленных списков наименований компонентов и наименований марок смесей. Подготовленные (корректные) образцы рецептов доступны для применения на операторских станциях.

Контейнеры заказов — из расчёта два (или более) на одну линию — предназначены для сохранения данных заказов на время их выполнения. По мере выполнения заказов контейнеры автоматически освобождаются и объявляются доступными для редактирования. В любой освободившийся контейнер оператор может поместить данные нового заказа, а именно: скопировать рецепт требуемого образца, определить план выпуска, маршрут отгрузки смеси и т.д. По готовности данных достаточно нажать кнопку «Выполнять» в окне контейнера, после чего данные заказа передаются по сети вычислительному устройству НЦУ для выполнения заказа в автоматическом режиме. Контейнеры заказов доступны оператору в необходимом для него объёме в виде окон, которые для удобства работы открываются непосредственно в кадрах визуализации технологического процесса на операторских станциях. В ходе выполнения заказа допускается частичное редактирование данных контейнера, например, списков используемых источников материалов для дозирования тех или иных компонентов.

Архив базы данных предназначен для долговременного хранения отчётных данных о выполнении заказов, включая следующие: исходные данные из контейнеров заказов; дата, время начала и окончания заказов; фактические объёмы произведённых смесей; истории дозирования компонентов (требуемые и фактические значения доз компонентов во всех замесах, значения влажности и температуры компонентов, время отгрузки каждого замеса); истории вмешательств в технологический процесс. По желанию заказчика в архиве могут вестись истории загрузки расходных бункеров, журналы регистрации действий оператора, регистрации нештатных и аварийных ситуаций, учёта моторесурсов оборудования, зонального рас-

хода электрической и тепловой энергии и т.д. — всего, что поддаётся инструментальному или организационно-инструментальному контролю.

Данные о выполнении заказов доступны для просмотра и печати на АРМ начальника цеха/технолога и в службах предприятия (через корпоративную сеть) в следующих вариантах группирования: сводный хронологический отчёт о выполнении заказов за указанный период (смену, сутки, несколько суток, месяц и т.д.) с данными о расходе материалов; сводный отчёт о выполнении заказов за указанный период с группированием данных по маркам смесей и с данными о расходе материалов; подробные отчёты о выполнении отдельных заказов (с историями дозирования и вмешательств) и т.д.

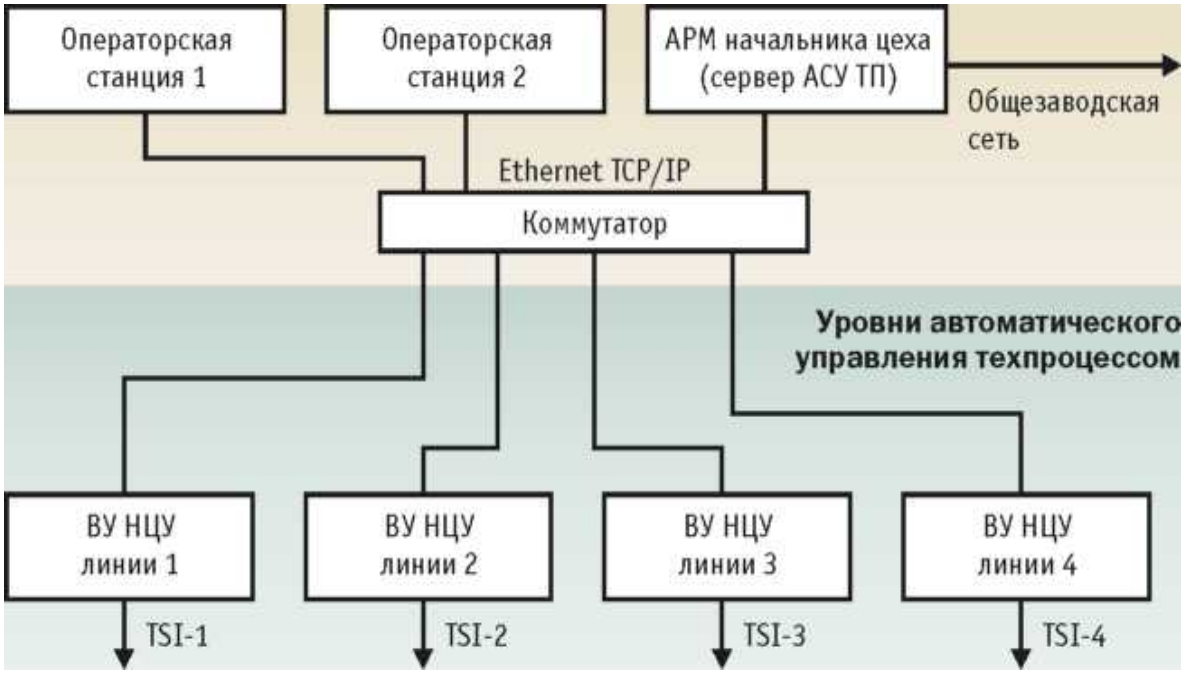



**Рис. 7.8. Структурная схема комплекса вычислительных средств АСУ ТП (ВУ НЦУ — вычислительные устройства непосредственного цифрового управления)**

Непременный атрибут верхних уровней управления — визуализированный человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) оперативного управления технологическим процессом — имеет развитую систему отображения состояний управляемых механизмов, условных и текстовых сообщений о текущих фазах механизмов, агрегатов и линий, оконную систему объявления директив, инструкций, уставок, выполнения калибровок измерительных

каналов и т.д. Для наиболее оперативных вмешательств в кадре предусмотрены кнопки с действием «в одно нажатие». Для других вмешательств и ведения диалога с системой управления в кадре имеется около 50 вызываемых окон. Всего в четырёх кадрах визуализации — более 150 диалоговых окон. Однако, несмотря на высокую функциональную насыщенность ЧМИ, всем цехом легко управляет один оператор. Кадры визуализации технологического процесса, так же как и данные архива, доступны удалённым клиентам (в первую очередь, директору завода) через корпоративную сеть предприятия в реальном масштабе времени.

Нижние уровни управления представлены в системе четырьмя вычислительными устройствами НЦУ (по количеству линий) и распределёнными УСО. Каждое вычислительное устройство укомплектовано изделиями производства фирмы Octagon Systems: каркасами 5203-RM, процессорными платами (микроконтроллерами) 6050, сетевыми платами 5500. Процессорные платы могут быть и других типов: 60x0, 6225, 5025A, 5070, 5066 или CPиб86E фирмы Fastwel. УСО полностью укомплектованы модулями и другими изделиями серии СА «Композит» производства группы компаний «Элтикон» и обеспечивают удалённый ввод-вывод всех необходимых дискретных и аналоговых сигналов.

Вычислительные устройства НЦУ осуществляют полное управление технологическим процессом в реальном масштабе времени. Их взаимодействие с верхними уровнями ограничено приёмом заданий, инструкций, директив, уставок и передачей отчётов о текущем состоянии (векторе) управляющей программы и объекта управления.

Управляющая программа каждой линии выполняет функции интеллектуального автомата, который контролирует технологический процесс на следующих уровнях (в следующих потоках данных):

- ввод-вывод сигналов через распределённые УСО;
- цифровая фильтрация, масштабирование и иная цифровая обработка сигналов;
- управление отдельными механизмами с учётом требуемых, фактических и системных состояний механизмов;

- решение задач управления агрегатами, то есть функциональными объединениями механизмов, в частности, дозаторами, смесителями, транспортирующими линиями и т.д.;
- решение задач обучения и адаптации к свойствам материалов и оборудования с целью, например, прогнозирования массы падающего столба при дозировании и т.д.;
- решение задач управления множеством агрегатов с учётом поступающих «сверху» заданий, инструкций, директив, а также состояний агрегатов, механизмов и собственно управляющей программы;
- планирование и регулирование потока частных заданий агрегатам с целью оптимизации использования ресурсов оборудования и конвейеризации технологического процесса;
- обслуживание интерфейса с верхним уровнем, в том числе поддержание диалога при вмешательствах, обеспечение доступа к сохраняемым уставкам и настроечным параметрам оборудования и технологического процесса, формирование отчёта о текущем состоянии управляющей программы и объекта управления (объём отчёта для задач автоматизации подобного класса — порядка тысячи переменных или тэгов);
- непрерывное сохранение данных о текущем состоянии (с контролем целостности данных) для обеспечения в случае несанкционированного выключения питания возможности «поднять» технологический процесс с той фазы, на которой он был прерван;
- непрерывная диагностика состояния технических средств системы управления, питающих сетей и т.д.

## 7.5. АСУ ТП бетонного завода

Представленная в данном разделе АСУ ТП была разработана и внедрена на бетонном заводе ООО «Торговый Дом Одинцово» [18].

Описание объекта автоматизации

Основными узлами бетонного завода являются три бетоносмесительные установки (БСУ), диспетчерская и лаборатория.

Функции БСУ:

- приготовление бетона (дозирование материалов согласно рецепту, выгрузка в смеситель согласно технологическому процессу);
- выгрузка бетона в автобетоносмеситель.

Функции диспетчерской:

- приём и оформление заявок;
- организация очереди, распределение и передача заявок на автоматизированные рабочие места операторов;
- контроль расхода цемента.

Основная функция лаборатории – контроль качества бетона.

Каждая БСУ имеет свою весовую систему, состоящую из тензодатчиков и подключённых к ним дозаторов. Помимо этого, в составе каждой БСУ есть два силоса (хранилища) для хранения и отгрузки активного вещества (цемент, известь). Во время выполнения заявки цемент может дозироваться только из одного из силосов. Каждая заявка состоит из циклов, количество которых определяется объёмом смесителя. Объём смесителя БСУ 0,5 куб. м. Для загрузки инертных материалов в смеситель установка БСУ оборудована специальным подъёмником – скипом.

Назначение и требования к АСУ ТП

Назначение разработанной АСУ ТП – увеличение максимального объёма производства, контроль исполнительных механизмов, постоянный контроль расхода материалов. Требования, предъявляемые к АСУ ТП:

- уменьшение времени, затрачиваемого на приготовление бетонной смеси, с сохранением при этом технологии производства;

- сохранение данных для контроля материалов и произведённой продукции как по каждому циклу, так и по заявке в целом;
- отслеживание, выявление и обработка аварийных ситуаций на БСУ;
- управление исполнительными механизмами на БСУ;
- организация управления очередью для автоматического распределения заявок по всем БСУ;
- изменение дозировок бетонных смесей лабораторией.

Описание системы

Основываясь на особенностях объекта автоматизации и предъявляемых требованиях, авторами [18] была разработана следующая структура АСУ ТП, представленная на рис. 7.9.

Система состоит из двух уровней: нижнего и верхнего. Нижний уровень представлен блоками контроллеров (БК) БСУ, которые предназначены для получения измерительной информации с датчиков и непосредственного управления исполнительными механизмами. Верхний уровень состоит из трёх автоматизированных рабочих мест (АРМ): АРМ операторов БСУ, АРМ диспетчера и АРМ лаборанта. Все АРМ объединены между собой при помощи сети Ethernet. Каждая БСУ управляется с соответствующего АРМ оператора через определённый БК БСУ, так что управление исполнительными механизмами какой-либо из установок БСУ невозможно с рабочих мест других установок.

БК БСУ собран на базе контроллера RTU-188 (фирма Fastwel), к дискретным выходам которого подключены три панели релейной коммутации TBR8 (Fastwel), а к дискретным входам — плата TBI-24LC (Fastwel) для установки модулей гальванической развязки и шесть блоков ADAM-3016 (компания Advantech) для нормализации сигналов с тензодатчиков (рис. 7.10). Через плату TBI-24LC подключаются модули входных реле 70L-IACA (Grayhill), обеспечивающие гальваническую развязку. Устройства блока контроллера размещены в двух разных шкафах фирмы Rittal с целью разделения соединений с исполнительными механизмами и с АРМ оператора, в обоих шкафах использованы клеммные соединители WAGO. Электропитание напряжением разных номиналов (24 и 5 В) обеспечивается источниками PWR-242-A (Advantech) и EWS15-5 (Nemic-Lambda).

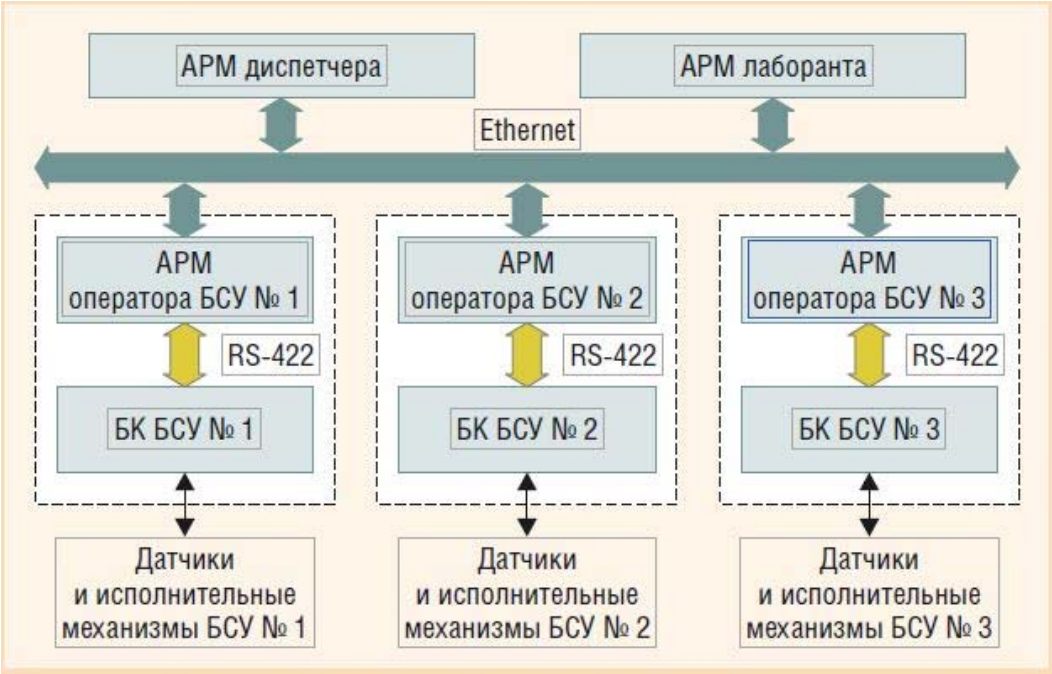



**Рис. 7.9. Структура АСУ ТП бетонного завода**

АРМ оператора БСУ реализовано на персональной ЭВМ (ПЭВМ). Для преобразования интерфейсов RS-422/RS-232 используется модуль ADAM4520 (Advantech). Программное обеспечение (ПО) АРМ оператора БСУ разработано в среде графического программирования LabVIEW компании National Instruments. Для организации связи между АРМ оператора и БК БСУ применены интерфейс RS-422 и PLCNet OPC Server фирмы Fastwel. Обмен данными между всеми участниками бетоносмесительного процесса осуществляется по протоколу TCP. Для защиты от перепадов напряжения БК БСУ и АРМ оператора БСУ подключены к источнику бесперебойного питания серии ML (фирма GE Digital Energy) мощностью 500 В·А.

ПО БК БСУ и АРМ оператора БСУ реализуют следующие режимы:

- сервисный режим (калибровка весов, установка нормальных параметров исполнительных механизмов и тестовый режим);
- ручной режим ввода заявки (заявка вводится оператором вручную);
- удалённый режим ввода заявки (заявка поступает от диспетчера по сети Ethernet);

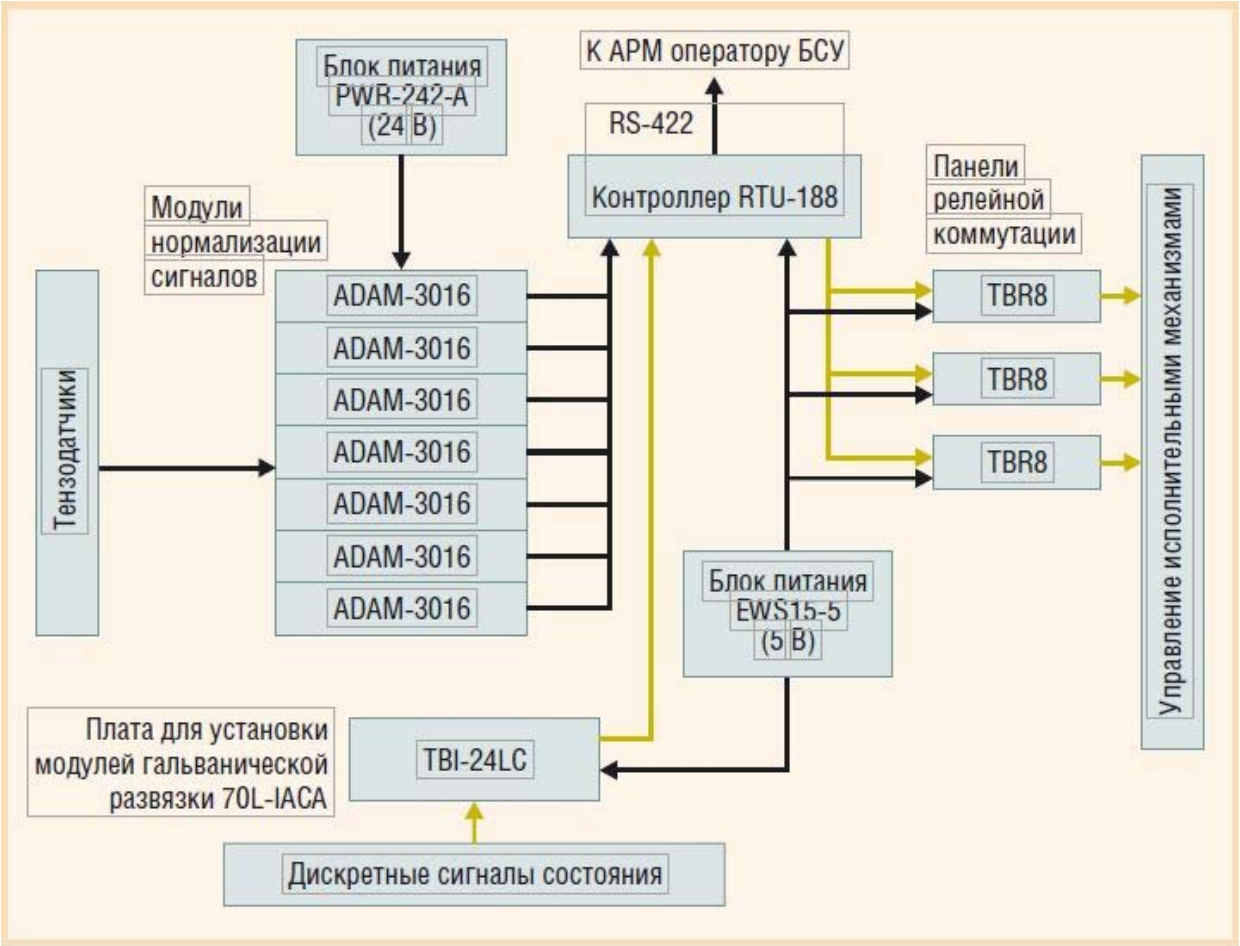



**Рис. 7.10. Структурная схема блока контроллера**

- автоматический режим выполнения заявки;
- полуавтоматический (ручной) режим выполнения заявки;
- аварийный режим выполнения заявки (выявление и обработка аварийных ситуаций);
- режим коррекции дозы по факту.

В сервисном режиме оператор БСУ вводит нормальные параметры исполнительных механизмов для автоматического выявления аварийных ситуаций при выполнении заявки. В тестовом режиме оператору предоставляется возможность управления исполнительными механизмами БСУ вне заявки для очистки бункеров и дозаторов, промывки смесителя и т.п.

В ручном режиме ввода заявки оператор выбирает смесь и самостоятельно вводит все необходимые данные по заявке, которые сохраняются в контрольных данных. В удалённом режиме ввода заявки оператору необ-

ходимо только указать номер силоса, с которого будет производиться дозирование цемента, и выбрать режим дозирования материалов (с коррекцией или без коррекции дозы на следующий цикл), так как остальные данные вводит диспетчер при вводе заявки и постановке её в очередь.

Автоматический режим выполнения заявки заключается в том, что при выполнении заявки все действия инициируются верхним и нижним уровнями, без участия оператора. Оператор в этом режиме только контролирует ход выполнения заявки.

В полуавтоматическом режиме оператор инициирует все действия системы (команды на загрузку и разгрузку дозаторов, смесителя и т.д.). Система только набирает положенный вес в дозаторы и отслеживает возникновение различных аварийных ситуаций. В полуавтоматическом режиме для обеспечения безопасности поднятие и опускание скипа происходит по команде оператора с ручного пульта оператора БСУ. Полуавтоматический режим необходим в двух случаях: при возникновении определённых ошибок в процессе выполнения заявки и при отгрузке некоторых видов смесей.

Режим коррекции дозы по факту – это режим выполнения заявки, при котором дозировки материалов на следующий цикл рассчитываются, исходя из массы отгруженных материалов. Этот режим позволил уменьшить погрешность отгрузки материалов и произведённой продукции до 1%. Сохранение контрольных данных по каждой заявке осуществляется на ПЭВМ, относящейся к определённой БСУ, и на АРМ диспетчера.

Основные функции АРМ оператора и БК БСУ:

- управление дозированием материалов, разгрузкой материалов из дозаторов и выгрузкой инертных материалов в смеситель при помощи скипа в соответствии с технологическим процессом приготовления бетонной смеси;
- сохранение контрольных данных;

- изменение (если требуется) дозировки воды для нормализации влажности выходной продукции и дозировки песка для некоторых видов смесей;
- автоматический расчёт дозировок на следующий цикл заявки;
- вывод на экран основных показателей текущей заявки;
- в случае необходимости (например, если система не отследила какую-либо ошибку) остановка автоматического выполнения заявки (данная опция активизируется по личному усмотрению оператора);
- расчёт количества циклов, исходя из введённого объёма заявки (бетона).

АРМ диспетчера оборудовано ПЭВМ со встроенной платой интерфейсов RS-422/RS-485 PCI-1602A фирмы Advantech и подсоединённым к одному из COM-портов термопринтером. Плата интерфейсов используется для организации связи АРМ диспетчера с табло, состоящим из шести сегментов. Табло используется для высвечивания номера заявки, которая или уже выполняется (как при ручном режиме ввода заявки, так и при удалённом режиме), или готова к выполнению при удалённом режиме ввода заявки. На термопринтере печатается талон со всей необходимой информацией: номер заявки, государственный номер автобетоносмесителя, марка состава, объём и т.д. Вся информация о заявке сохраняется в базе данных, в которой при желании можно отследить её полный «жизненный цикл». Одной из задач диспетчера является отслеживание количества цемента в силосах каждой БСУ для их своевременного пополнения. На экран АРМ диспетчера выводится информация о марке цемента в каждом из силосов, а также о его массе, которая рассчитывается исходя из разницы массы цемента, отгруженного в силос при помощи перевозчика цемента, и массы цемента, израсходованного при изготовлении бетона. Такой подход позво-

лил сэкономить на приобретении датчиков уровня для хранилищ цемента. На экран монитора АРМ диспетчера выводится информация о состоянии каждой БСУ. Если в данный момент времени на БСУ выполняется заявка, то для задействованной установки на экране высвечиваются номер заявки, количество выполненных циклов, количество выполняемых циклов и госномер автобетоносмесителя.

Основные функции АРМ диспетчера:

- ввод (если требуется) заявки для последующей передачи её по сети;
- распечатка на термопринтере талона заявки с необходимыми данными;
- вывод номера исполняемых заявок на табло;
- контроль количества активного вещества (цемент, известь) в силосах каждой БСУ;
- контроль состояния каждой БСУ.

АРМ лаборанта – это ПЭВМ с установленным ПО. Основная функция лаборанта – оперативное изменение дозировок при изменении характеристик материалов, необходимых для приготовления бетона. Основной такой характеристикой является влажность инертных материалов, изменение которой может оказать влияние на прочность бетона. В АРМ лаборанта для удобства работы предусмотрена возможность создания и редактирования собственных групп дозировок.

Основные функции АРМ лаборанта:

- учёт влажности инертных материалов дозировок бетона и других смесей;
- работа с базой данных дозировок смесей;
- расчёт активных добавок для всех смесей;

- создание и редактирование собственных групп дозировок;
- сохранение дозировок на АРМ диспетчера и всех АРМ операторов;
- установка пределов изменения дозировки воды по каждому виду смесей.

АРМ диспетчера системы поддерживает до трёх АРМ операторов, каждый из которых обслуживает определённую БСУ. Благодаря разработанной АСУ ТП удалось достичь следующих характеристик технологического процесса:

- минимальный объём заявки – 0,1 $м^3$;
- максимальный объём заявки – 9,9 $м^3$;
- максимальное количество циклов в заявке – 20;
- относительная погрешность отгрузки материалов – 1%;
- время функционирования системы при отключённом электропитании – до 10 мин.

Использование описанной АСУ ТП позволило:

- снизить погрешность дозирования расходных материалов;
- улучшить качество бетона;
- ввести контроль расхода материалов и отгружаемой продукции;
- увеличить количество видов отгружаемой продукции.

Разработанная система может применяться как целиком, так и отдельными блоками. В частности, АРМ оператора БСУ и БК БСУ могут использоваться отдельно от диспетчерской и лаборатории [18].

## 7.6. АСУ тепловлажностной обработкой железобетонных изделий

В настоящее время на заводах сборного железобетона для ускорения процесса твердения везде используется термообработка отформованных изделий в пропарочных камерах. Изделия загружаются в камеру, камера закрывается и подаётся пар. Контроль режимов термообработки, как правило, производится с использованием ртутных термометров, термометров сопротивления, включенных в измерительные схемы мостов или логометров.

Анализ факторов теплопотребления показывает, что для экономии энергоресурсов следует решить три основные задачи [19]:

1. Контроль загрузки камер**.** Степень загрузки камер изделиями непосредственно влияет на удельный расход тепла, соответствующие цифры приведены в справочниках. Камера должна быть полностью загруженной. Однако часто камера включается недогруженной или в неё загружаются изделия малого объёма, то есть значительная часть камеры занята формами или поддонами, в которых загружаются изделия.

2. Точное соблюдение режима термообработки**.** Это позволяет исключить перерасход энергоресурсов и получить качественные изделия, без трещин и других дефектов.

3. Оптимизация режимов термообработки. При заданной прочности изделий оптимизация режимов термообработки позволяет получить экономию энергоресурсов. Многочасовое пропаривание при 80°С в современных условиях — непозволительная роскошь.

Для решения данных задач в ООО «Рыбинскэнергожелезобетон» была создана система управления тепловлажностной обработкой «Экон» [19], которая полностью заменила устаревшую контрольно-измерительную аппаратуру. Система «Экон» построена на базе современной вычислительной техники и к настоящему времени внедрена также на нескольких заводах Ярославля и Рыбинска.

## Назначение, исполнение и электропитание системы

Система предназначена для автоматического управления камерами тепловлажностной обработки железобетонных изделий и ведения учёта результатов работы. Количество камер до 48. Каждая камера имеет датчик температуры и клапан управления подачей пара. Камеры территориально объединены в группы, каждая из которых может иметь свою систему вентиляции.

Система изготовлена в исполнении УХЛ, категория размещения 4 по ГОСТ 15150-69 и должна эксплуатироваться в закрытых отапливаемых помещениях при температуре 0…+45°С. Воздействие механических нагрузок по ГОСТ 17516-72 для группы М3.

Электропитание системы управления осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 187...242 В с частотой 50 Гц. Показатели качества электроэнергии должны соответствовать ГОСТ 13109-87.

## Основные технические данные и характеристики

Система управления обеспечивает:

- автоматическое управление камерами в соответствии с заданным для каждой из них технологическим процессом, основными операциями которого являются предварительная выдержка, нагрев, изотермическая выдержка, охлаждение, вентилирование;
- нагрев или охлаждение ступенями, с промежуточной выдержкой (количество ступеней до 10);
- автоматическую регистрацию параметров реализуемых технологических процессов;
- измерение температуры, давления и расхода пара;
- учёт расхода пара и расчёт удельного расхода;

- автономную работу камер при выключенном управляющем компьютере после загрузки задания на технологические процессы для каждой камеры;
- диагностику состояния оборудования;
- подготовку отчётов.

Основные технические характеристики системы отражает табл. 7.2.

Таблица 7.2

**Основные технические характеристики системы**

| | |
|---|---|
| Количество камер | 48 |
| Погрешность измерения температуры | ±0,2°С |
| Погрешность поддержания температуры | ±2°С |
| Пределы регулирования давления пара | 80...500 кПа |
| Погрешность поддержания давления пара | ±30 кПа |
| Напряжение питания унифицированных датчиков | 24/36 В |
| Напряжение цепей управления исполнительными механизмами | 220 В |
| Ток нагрузки | 1,0 А |
| Средний срок службы при круглосуточном режиме работы | 10 лет с учётом проведения восстановительных работ |
| Потребляемая мощность | Не более 200 В·А |

Порядок функционирования системы

Система управления предоставляет технологу широчайшие возможности по организации и оптимизации технологического процесса. Приведём некоторые из них:

- контроль степени загрузки каждой камеры изделиями (для начала технологического процесса требуется указать наименование и количество загруженных изделий, пользуясь встроенным справочником изделий, и система автоматически рассчитывает коэффициент загрузки камеры; при недостаточной загрузке система требует указать фамилию лица, ответственного за включение этой камеры);
- задание даты и времени начала технологического процесса для каждой из камер (это позволяет произвести пропарку ночью или в выходной день, когда стоимость пара ниже);

- задание для каждой камеры времени и характеристики подъёма температуры (по линейному закону, на максимальной скорости, ступенями, ступенями с промежуточной выдержкой, а также их комбинацией; количество ступеней до 10);
- задание времени и характеристики охлаждения (произвольной, линейной, ступенями и т.д.) для каждой камеры;
- задание режима работы вентиляторов камер;
- ведение справочника изделий и справочника типовых технологических процессов;
- регистрация температуры и периода включения каждой камеры, регистрация температуры воздуха в цехе, температуры, давления и расхода пара, вывод всей накопленной информации в графическом виде для анализа;
- учёт потреблённого пара и расчёт удельного расхода пара на 1 $м^3$ бетона;
- ведение архива выполненных технологических операций;
- печать отчётных документов.

Это неполный перечень, иллюстрирующий возможности системы, которая с одинаковым успехом позволяет работать по «устоявшимся» типовым заданиям и производить экспериментальную отработку новых технологических режимов.

Несмотря на многообразие возможностей, работать с системой может даже неквалифицированный оператор: достаточно для соответствующих камер указать загруженные изделия, пользуясь справочником изделий, и выбрать технологический процесс из справочника типовых технологических процессов, а затем дать команду «Начать техпроцесс».

Далее система работает автоматически. В заданное время включается запорно-регулирующий клапан подачи пара (рис. 7.11), и после достижения на входе в камеры заданного давления пара, которое затем автоматически поддерживается системой, открываются клапаны подачи пара (рис. 7.12) в заданные камеры. Температура в камерах контролируется по пока-

заниям датчиков температуры и поддерживается системой посредством регулирования подачи пара в каждую камеру.

**Рис. 7.11. Запорно-регулирующий клапан подачи пара**

**Рис. 7.12. Электромагнитный клапан подачи пара в камеру**

В процессе работы производится непрерывный контроль состояния оборудования и при обнаружении отклонений параметров технологического процесса от нормы или отказов оборудования выполняется аварийное отключение неисправной камеры. При отсутствии давления пара в магистрали или при проблемах с электропитанием производится аварийный останов системы с последующим восстановлением прерванных технологических процессов. Важной особенностью является то, что система управления пытается самостоятельно устранить возникшую проблему (если это

возможно) и только после нескольких неудачных попыток производит отключение неисправной камеры или полный аварийный останов. Даже после полного аварийного останова система делает определённую паузу (от нескольких минут до нескольких часов — устанавливается в параметрах системы) и вновь пытается восстановить технологический процесс.

Система работает под управлением IBM PC совместимого промышленного контроллера, который обеспечивает ввод данных с датчиков, обработку данных и вывод управляющих команд на исполнительные органы, а также регистрирует и сохраняет во флэш-памяти параметры выполняемых технологических процессов и параметры состояния оборудования. Во флэш-память контроллера при монтаже системы записываются параметры камер и другого технологического оборудования, параметры ПИД-регуляторов, нормализаторов входных сигналов, цифровых фильтров, таблица логических каналов, ключи доступа и т.д. Программное обеспечение (ПО) контроллера написано на языке C++ и работает в среде ROM-DOS. Контроллер соединён по каналу RS-232 с управляющим компьютером.

Управляющий компьютер обеспечивает цветное графическое отображение процесса работы оборудования, позволяет оператору вводить данные, хранит справочник изделий и справочник типовых технологических процессов, подготавливает и хранит отчёты о выполненных заданиях и управляет контроллером. ПО управляющего компьютера создано в среде C++ Builder и работает под управлением Windows.

После запуска ПО компьютера открывается главное окно, в котором изображается мнемосхема расположения камер в цехе. Состояние каждой камеры показано соответствующим цветом: коричневый — отключена, серый — свободна, синий — загружена изделиями, голубой – готова к работе, жёлтый — идёт технологический процесс, зелёный – технологический процесс завершён, красный — авария, розовый — выполнен аварийный останов технологического процесса оператором.

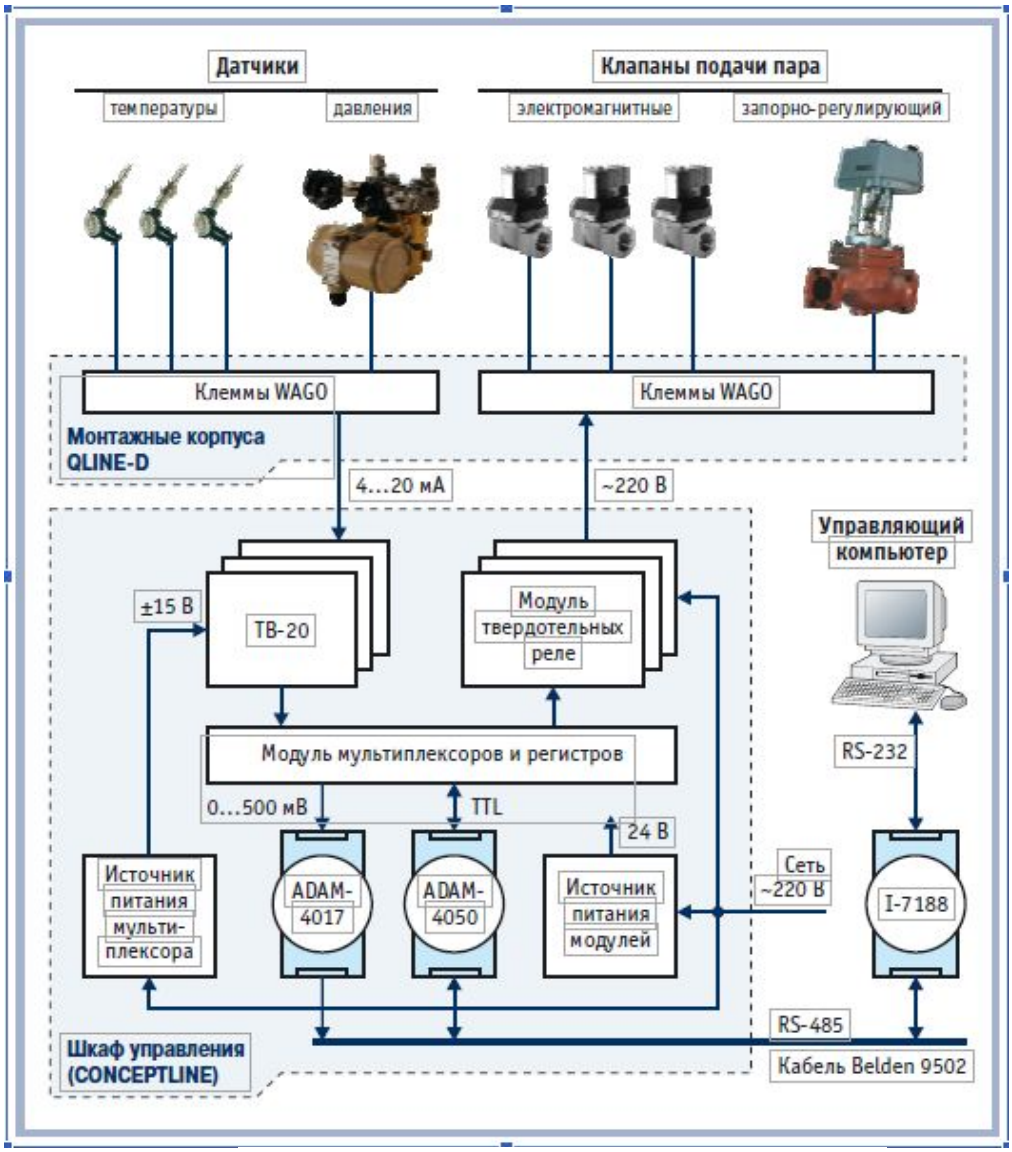



**Рис. 7.13 . Структурная схема системы управления тепловлажностной обработкой**

Для просмотра в графическом виде параметров технологических процессов предназначено окно «Осциллограф». Технолог имеет возможность просматривать непосредственно во время работы по текущим данным (режим мониторинга) или на основе накопленных в архиве данных следующие параметры и характеристики технологического процесса: задание, температуру в камерах, период включения камер, температуру пара, давление пара в магистрали, регулируемое давление пара, расход пара, температуру в цехе, гистограмму периода включения камер, а также ошибки, зафиксированные системой управления. Предусмотрен выбор масштаба представления графиков с помощью соответствующих кнопок панели

инструментов или мыши. Кроме того, на панели инструментов имеются кнопки генерации отчёта о технологическом процессе, вычисления общего расхода пара и расхода за выделенный в окне «Осциллограф» период времени, инициации показа гистограммы периода включения камер. Если указатель мыши поместить в область графика на линию характеристики и щелкнуть левой кнопкой, на панель состояния выводится тип графика, значение температуры или давления, дата и время в этой точке. Например: «Камера 3. Температура 38°С. Дата 10.10.2004. Время 14:27», «Входное давление пара 620 кПа. Дата 10.10.2004. Время 14:30». Кроме того, выделенная характеристика подсвечивается. Одновременно может быть открыто до шести окон «Осциллограф», в которых может быть выведена любая доступная информация.

Аппаратные средства системы

Структурная схема системы управления тепловлажностной обработкой представлена на рис. 7.13. Управляющие функции выполняет контроллер связи I-7188, который имеет ОЗУ 256 кбайт, флэш-память 512 кбайт, последовательные порты RS-232 и RS-485, порт консоли, сторожевой таймер, часы реального времени и совместим с операционной системой ROM-DOS. По каналу RS-232 контроллер соединён с управляющим компьютером, а по каналу RS-485 (кабель Belden 9502) — со шкафом управления .

Шкаф управления выполнен на базе конструктива CONCEPTLINE (фирма Schroff). В шкафу установлены модули аналогового ввода ADAM-4017 и цифрового ввода-вывода ADAM-4050 фирмы Advantech (могут использоваться и аналогичные им модули ряда I или RIO), модуль мультиплексора и регистров, модули твердотельных реле (Cosmo), источники питания. Для подключения аналоговых сигналов к модулю мультиплексора используются клеммные платы TB-20 (Fastwel). Шкаф управления соединён кабелями с датчиками и клапанами подачи пара, для подключения которых в местах установки оборудования используются монтажные корпуса QLINE-D (Schroff) с клеммами WAGO. Для фиксации кабелей используются кабельные вводы RST.

Модуль мультиплексора и регистров (собственная разработка) позволяет увеличить количество аналоговых входов системы до 56 и количество цифровых выходов до 64. Для управления используются цифровые выходы модуля ADAM-4050, разбитые в соответствии с табл. 2 на три группы: адрес канала N мультиплексора, данные для канала N мультиплексора и строб, определяющий выбор полурегистра (4 младших или 4 старших разряда одного из восьми регистров выходных цифровых данных).

Время переключения каналов мультиплексора определяется длительностью цикла измерения в модуле ADAM-4017. Возможное искажение данных на одном из аналоговых каналов из-за отсутствия синхронизации модуля мультиплексора и регистров с модулем ADAM-4017 компенсируется программно (статистическая фильтрация).

Достаточно длительный период опроса датчиков для данной системы не является критичным, поскольку изменение температуры в технологическом процессе происходит относительно медленно.

Для измерения температуры используются медные термометры сопротивления ТСМУ-205 (Элемер) с унифицированным выходным сигналом 4…20 мА. Такой же выход имеют датчики давления «Сапфир».

Компьютер и контроллер находятся в помещении заводской лаборатории, остальные элементы системы расположены в местах установки оборудования и удалены от лаборатории на 450 м. Шкаф управления CONCEPTLINE и монтажные корпуса QLINE-D, оснащённые герметизирующими кабельными вводами RST, обеспечивают для элементов системы степень защиты IP64.

Внедрение в ООО «Рыбинскэнергожелезобетон» системы управления тепловлажностной обработкой «Экон» позволило снизить удельный расход пара на 1 м$^3$ бетона с 0,32 Гкал/м$^3$ до 0,11 Гкал/м$^3$.

Опыт эксплуатации системы «Экон» показал её высокую надёжность при круглосуточном режиме работы. В настоящее время на основе описанного комплекта оборудования и аппаратных решений авторами создаётся новая система управления тепловой обработкой для кассетного производства железобетонных изделий и щелевых камер [19].

## 7.7. АСУ процессом обжига керамических изделий

В данном разделе описывается автоматизация, выполненная на Голицынском керамическом заводе в последние годы [20].

Объект автоматизации представлен двумя технологическими объектами: туннельной обжиговой печью (система «Обжиг») и группой машин, обеспечивающих толкание по печи, а также движение вагонов (вагонеток) по замкнутому циклу вне печи и подачу их для садки и выставки продукции (система «Транспорт печи») [20].

Туннельная обжиговая печь имеет длину 348 м. Садка на обжиговый вагон производится 12 пакетами по 832 кирпича, что в общем счёте составляет 9984 кирпича. Ёмкость печи — 57 вагонов.

Система «Обжиг» распространяется на 18 зон обжига с горелками, расположенными по обеим сторонам печи, в каждой зоне — от 2 до 6 горелок, объединённых одним технологическим циклом. Также система обеспечивает необходимые параметры технологических процессов работы дымососов, нагнетания воздуха для горелок и под вагонное пространство, рекуперации, перемешивания, ускоренного охлаждения.

Процесс обжига представляет собой повышение температуры в зонах по заданному температурному графику с плавным переходом критической точки кварца (фазовое превращение кварца с резким объёмным изменением при температурах 550...600°С, что сопряжено с опасностью растрескивания изделий) вверх, выдержку при заданной температуре, плавный переход критической точки кварца вниз и ускоренное охлаждение.

Тепло получают сжиганием газа высокого давления. Отсос продуктов сгорания из печи осуществляется через управляемые заслонками дымососы и системы газоочистки.

Цель автоматизации

Цель автоматизации складывалась из следующих составляющих:

- повышение технико-экономических показателей работы технологических агрегатов за счёт усовершенствования системы контроля и управления;
- оперативная сигнализация и протоколирование хода технологического процесса, повышение технологической дисциплины, повышение производительности и улучшение условий труда эксплуатационного персонала;
- выполнение требований безопасности;
- предупреждение возникновения аварийных ситуаций;
- повышение качества выпускаемой продукции.

## Выбор средств автоматизации

В качестве базового оборудования авторами были выбраны контроллеры серии S7-300 с процессорными модулями S7-315-2DP фирмы Siemens, выпускающей широкий спектр комплектующих для систем промышленной автоматизации. Фирменное программное обеспечение Step 7 содержит все необходимые средства для конфигурирования, программирования и отладки системы. Программный пакет WinCC обеспечивает визуализацию технологического процесса, управление с операторских станций, архивирование данных и формирование отчётов; кроме того, этот пакет обеспечивает возможность связи между прикладными программами пользователя и приложениями Windows.

## Функции системы и решаемые задачи

Система состоит из контроллеров серии S7-300, сервера на базе ПК с программой визуализации WinCC (станция WinCC) и рабочей станции, объединённых шиной PROFIBUS-DP в многомастерную сеть. Схема системы показана на рис. 7.14.

Разработанная система выполняет следующие функции:

- автоматический розжиг и отключение горелок, контроль и стабилизация пламени;
- сигнализация об отказе розжига;
- поддержание заданной температуры в зонах обжига согласно режимной карте;
- поддержание заданной аэродинамики в печи;
- автоматический пуск печи;
- автоматическая остановка печи при срабатывании автоматики безопасности;
- вывод данных технологического процесса на цифровые указатели пульта оператора и на экран системы визуализации;
- регистрация, хранение, архивирование и документирование информации о технологическом процессе;
- усиленный контроль параметров и режимов работы технологических устройств и машин, предупреждение отказов;
- отображение текущего состояния оборудования;
- отображение уставок и их корректировка;
- отображение трендов температур в зонах печи;
- контроль работы машин и механизмов с выдачей предупреждений (звуковой и световой индикацией) и регистрацией отказов в журнале;
- архивирование кривой обжига для каждого вагона;

- архивирование записей по толканиям;
- генерация отчёта за смену.

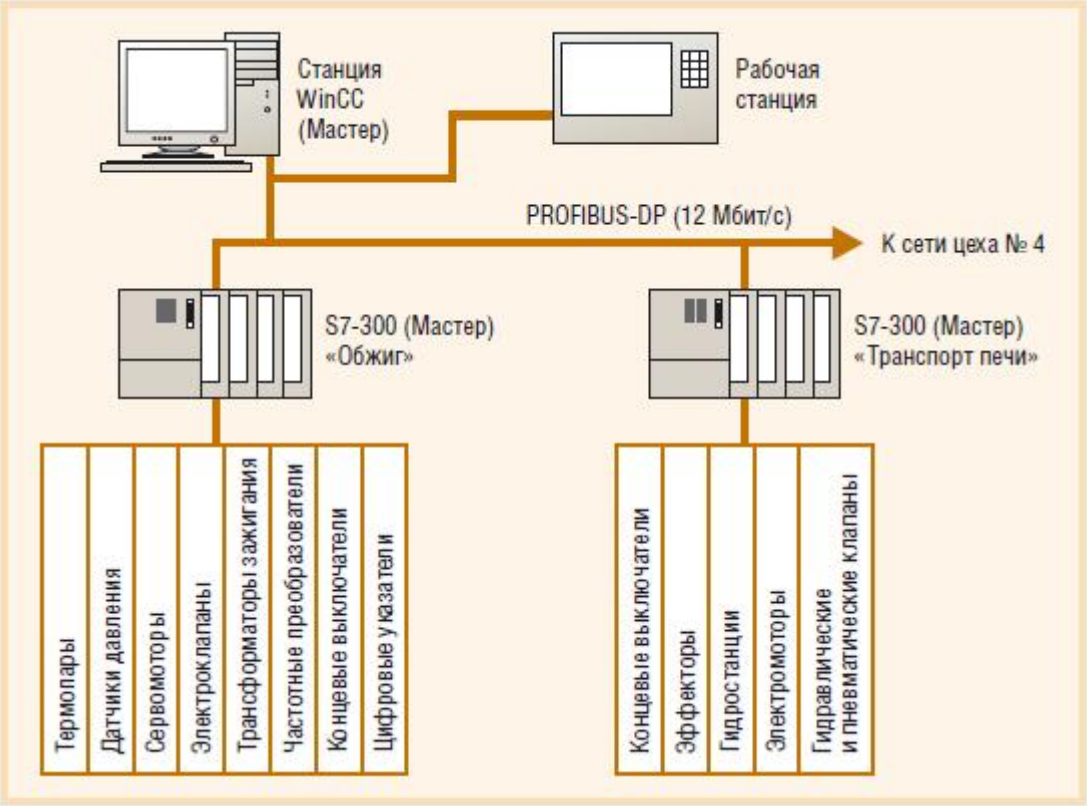



**Рис. 7.14. Схема сети управления печным переделом**

Многомастерное построение сети позволяет контроллерам работать независимо друг от друга, поэтому остановка станции WinCC либо контроллера не вызывает остановку всей системы, и остальные составляющие системы продолжают работать.

Розжиг печи производит оператор путём включения тумблера на пульте, при этом запускаются дымососы и нагнетающие вентиляторы, устанавливается заданная аэродинамика печи, загорается зелёная лампа пуска печи. Контроллер от оператора получает сигнал «Maxson взведён» и начинает розжиг горелок. Одновременно производится розжиг не более трёх зон (в них восемнадцать горелок). Если после трёх попыток розжига горелка не разожглась, выдаётся сигнал «Отказ розжига горелки».

Контроллер поддерживает температуру в зоне обжига согласно режимной карте на данный вид продукции путём перевода горелок на малое или большое пламя. Температура по зонам печи и аэродинамические характеристики отображаются на цифровых указателях пульта оператора и на экранной форме «Печь» станции WinCC (рис. 7.15). На этой же экран-

ной форме доступна информация о режиме толкания, времени до толкания, отказах оборудования.

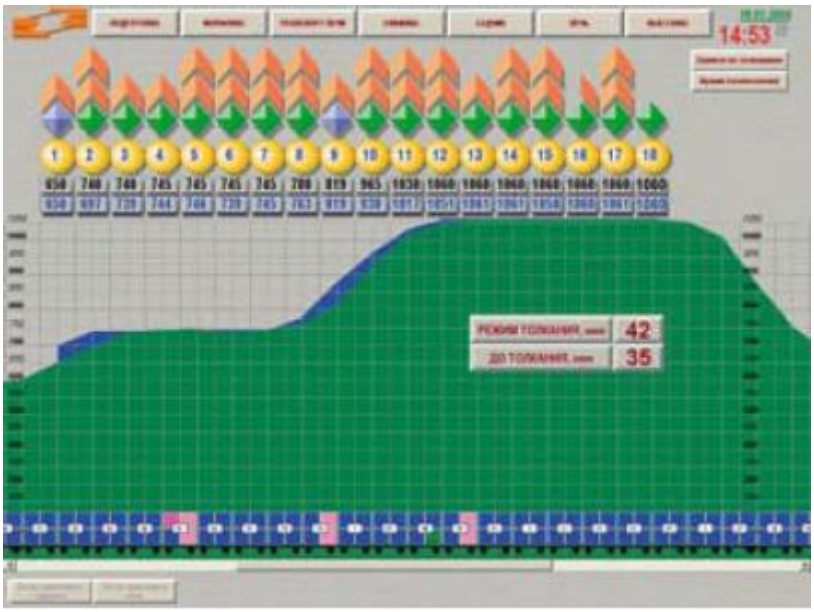



**Рис. 7.15. Экранная форма «Печь»**

Информация о режиме обжига для каждого вагона ежеминутно архивируется, что даёт возможность технологам проверить соблюдение технологической карты путём просмотра экранной формы «Технология» (рис. 7.16).

Система позволяет в масштабе реального времени отслеживать местоположение каждого из ста четырёх вагонов, обслуживающих печь, а также вид загруженной продукции. При изменениях параметров режима работы машин и механизмов более чем на 10% выдаётся предупреждение с указанием неисправности и способов её устранения. При изменениях более 15% выдаётся сигнал об аварии. Кроме того, оператор имеет возможность на экранных формах «Транспорт печи» поставить на контроль любую машину и механизм.

Все предупреждения и отказы заносятся в журнал отказов, который можно просмотреть в экранной форме «Отказы печи». Наряду с этим система генерирует полный отчёт каждой смены.

## Аппаратные средства

В качестве станции WinCC (рис. 7.17) используется IBM PC совместимый компьютер Pentium III/ 1300 МГц с сетевым адаптером CP5611 (плата, обеспечивающая связь по MPI и PROFIBUS). В процессе реализа-

ции данного проекта возникли проблемы в связи с недостаточной мощностью этого компьютера [20].

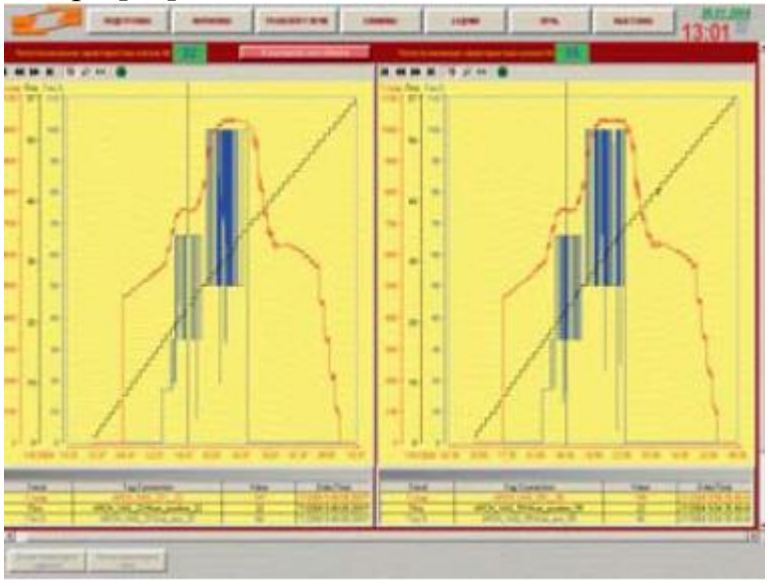



**Рис. 7.16. Экранная форма «Технология», отображающая кривую обжига для выбранного вагона**

**Рис. 7.17. Вид пульта операторов и станции на WinCC**

В результате обсуждений для решения этой проблемы все расчёты параметров процесса, данные визуализации и анимация были переложены на котроллеры. Контроллеры производят все расчёты, а станция считывает уже готовые результаты. Это позволило разгрузить компьютер станции WinCC и получить дополнительный положительный эффект за счёт того, что при временном отключении станции WinCC данные анимации не теряются и не требуют корректировки.

Контроллеры систем «Обжиг» и «Транспорт печи», размещённые в соответствующих шкафах, показаны на рис. 7.18.

**Рис. 7.18. Шкафы контроллеров «Обжиг» и «Транспорт печи»**

Состав контроллера «Обжиг» приведён в табл. 7.3.

Таблица 7.3

**Состав контроллера «Обжиг»**

| Модуль | Обозначение | Количество |
|---|---|---|
| Процессорный модуль | S7-315-2DP | 1 |
| Интерфейсный модуль | IM360 | 1 |
| Интерфейсный модуль | IM361 | 3 |
| Модуль дискретного ввода | DI32xDC24V | 9 |
| Модуль дискретного вывода | DO32xDC24V/0.5A | 8 |
| Модуль аналогового ввода | AI8x12Bit | 8 |
| Модуль аналогового вывода | AO8x12Bit | 2 |

Таблица 7.4

**Состав контроллера «Транспорт печи»**

| Модуль | Обозначение | Количество |
|---|---|---|
| Процессорный модуль | S7-315-2DP | 1 |
| Интерфейсный модуль | IM360 | 1 |
| Интерфейсный модуль | IM361 | 1 |
| Модуль дискретного ввода | DI32xDC24V | 6 |
| Модуль дискретного вывода | DO32xDC24V/0.5A | 4 |

Каналы АЦП подключены по току 4...20 мА. Термопары снабжены преобразователями температуры с программируемой нелинейностью SITRANS TK 7NG 3120-1JN00 фирмы Siemens, что дало возможность отказаться от дорогих термокомпенсационных проводов и использовать

провода (протяжённость линий составляет до 380 метров) типа витая пара. Последовательно с АЦП контроллера подключены цифровые указатели MCR-SL-D-U/I фирмы Phoenix Contact, установленные на пульте оператора. ЦАП являются задатчиками для частотных преобразователей Moveret фирмы SEW-Eurodrive, управляющими двигателями вентиляторов. На газовом оборудовании использована регулирующая арматура фирмы Kronshredor.

В проекте также задействованы фотоэлектрические и индуктивные датчики компании Pepperl+Fuchs. На их базе построены широко применяемые в системе концевые выключатели.

Рабочая станция собрана из системного блока Pentium II 500 МГц, плоскопанельного монитора от встраиваемого промышленного компьютера серии AWS фирмы Advantech, сетевого адаптера CP5611. Она предназначена для просмотра программы контроллера оператором или наладчиком сушильно-печного комплекса с целью выявления причин возникшего отказа оборудования, а также для внесения изменений в программы сотрудниками отдела АСУ ТП.

Разработанная и введённая в эксплуатацию группой АСУ ТП система управления обжигом керамических изделий успешно функционирует.

Внедрение системы обеспечило повышение производительности, безопасности и эффективности работы печного комплекса цеха № 4 по сравнению с цехом № 3, в котором используется старая система релейной автоматики и велико значение человеческого фактора. В цехе № 4 влияние человеческого фактора сведено к минимуму. Эффективность достигается за счёт более высокого уровня качества контроля параметров, более высокой оперативности защиты от недопустимых ситуаций.

Новая система позволяет дежурному и ремонтному персоналу выявлять слабые места в работе машин и механизмов, более рационально планировать предупредительный ремонт. Для технологов система автоматизировала сбор данных о технологическом процессе. При проведении экспериментов, связанных с разработкой новых видов продукции, система позволяет получать развёрнутые кривые обжига для любого вагона по всему циклу его прохождения по печи.

## 7.8. Система автоматизации процесса автоклавной обработки силикатного кирпича

Производство силикатного кирпича состоит из ряда операций, таких как дозирование, перемешивание, формование, автоклавная обработка. Каждый из этих процессов вносит свой вклад в качество конечного продукта.

В данном разделе рассматривается автоклавная обработка кирпича, разработанная в ООО «Ресурс» (г. Рязань) и внедренная на Рязанском заводе силикатных изделий [21]. Главным отличием данной системы управления является ее относительно низкая стоимость. В качестве управляющего элемента применяется компьютер, а для организации взаимодействия между компьютером и датчиками непрерывных и дискретных параметров и для выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы используются модули распределённого ввода/вывода серии ADAM-4000 компании Advantech.

Основные функции системы

После окончания процесса прессования сырец силикатного кирпича поступает для прохождения тепловлажностной обработки в автоклав. Автоклав представляет собой горизонтально расположенный стальной цилиндр с герметически закрывающимися с торцов крышками. Процесс запаривания сырца состоит из трёх последовательных этапов (рис. 7.19).

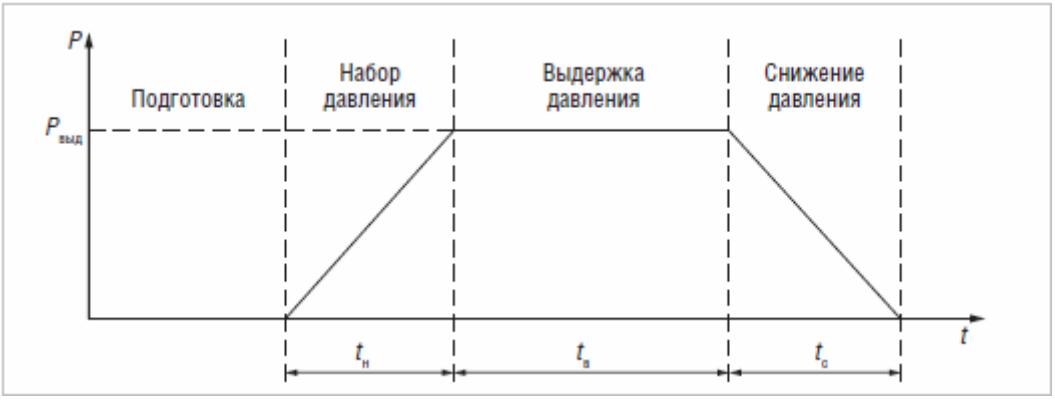



**Рис. 7.19. Последовательность этапов автоклавной обработки**

Первый этап (набор давления P) длительностью $t_н$ начинается с поступления смеси в аппарат и продолжается до выравнивания показателей температуры пара и самого изделия. Во время прохождения второго этапа (выдержка давления) температура и уровень давления $P_{выд}$ поддерживают-

ся на постоянном уровне в течение времени $t_В$, чтобы в толще кирпича начались и завершились следующие физико-химические процессы: выпаривание излишнего количества влаги и образование гидросиликата кальция. На этом этапе происходит затвердевание кирпича. Третий этап (снижение давления) — остывание готового продукта после прекращения теплового воздействия на него в течение времени $t_С$. После окончания этапа снижения давления готовый силикатный кирпич поступает на склад для хранения и упаковки. Для получения силикатного кирпича с заданными характеристиками необходимо обеспечить возможность задания значения давления выдержки $P_{выд}$, длительности набора $t_Н$, выдержки $t_В$ и снижения $t_С$ давления пара в автоклаве.

Для снижения внутренних напряжений в конструкции автоклава система должна обеспечивать контроль температуры вверху, внутри и внизу автоклава, скорость нарастания давления в нём и скорость нарастания температуры, разность температуры вверху и внизу автоклава. В ходе процесса автоклавной обработки необходимо контролировать положение впускной и выпускной задвижек безопасности и регулирующих задвижек острого и мятого пара.

Архитектура системы и используемые программно-технические средства

Структурная схема системы в части контура управления автоклавом приведена на рис. 7.20 (на схеме показан контур управления только одним автоклавом, управление другими автоклавами организовано аналогично).

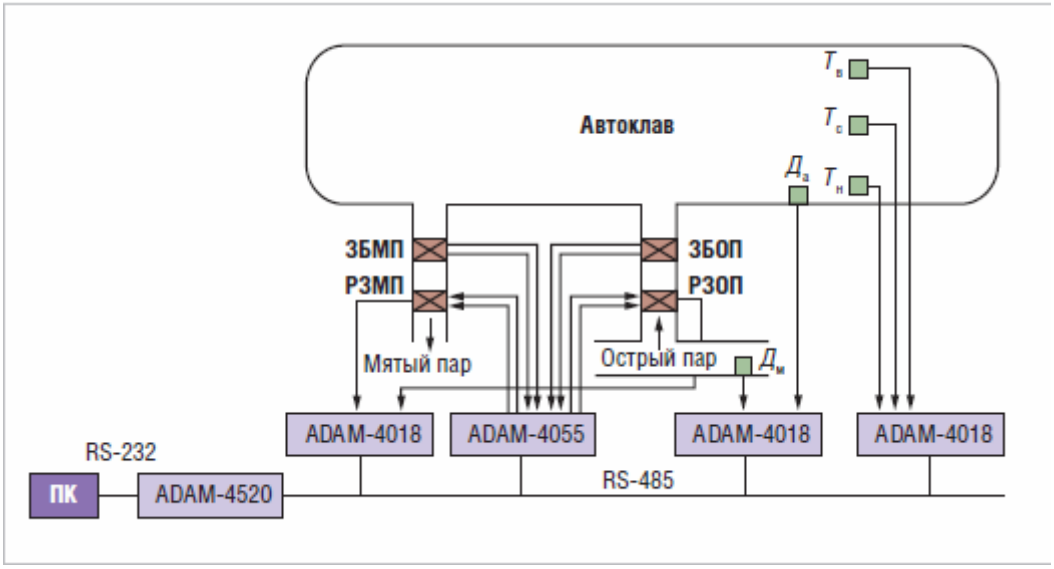



**Рис. 7.20. Структурная схема системы автоматизации процесса автоклавной обработки силикатного кирпича**

В каждом автоклаве контроль температуры осуществляется тремя термопарами: $T_в$ — вверху, *Т*с — в середине и *Т*н — внизу. Все эти термопары подключены к модулю аналогового ввода ADAM-4018. Состояние задвижек безопасности острого пара (ЗБОП) и задвижки безопасности мятого пара (ЗБМП) определяется по сигналам соответствующих концевых выключателей, поступающим на модуль дискретного ввода-вывода ADAM-4055. Регулирование набора давления в автоклаве производится регулирующей задвижкой острого пара (РЗОП), а снижение давления — регулирующей задвижкой мятого пара (РЗМП). Положение РЗОП и РЗМП контролируется посредством модуля ADAM-4018, настроенного на измерение напряжения. Управление задвижками РЗОП и РЗМП осуществляется с выходов с открытым коллектором модуля ADAM-4055 через электромеханические реле фирмы Omron. Контроль давления в автоклаве и подающей магистрали производится измерительными преобразователями SITRANS P серии Z фирмы Siemens (Да и Дм), подключёнными к модулю ADAM-4018. Модули ввода-вывода ADAM объединены по интерфейсу RS-485 и через интерфейсный преобразователь (RS-232/RS-485) ADAM-4520 подключены к COM-порту персонального компьютера (ПК). Фотография шкафа управления шестью автоклавами, выполненного на базе конструктива фирмы Schroff, приведена на рис. 7.21.

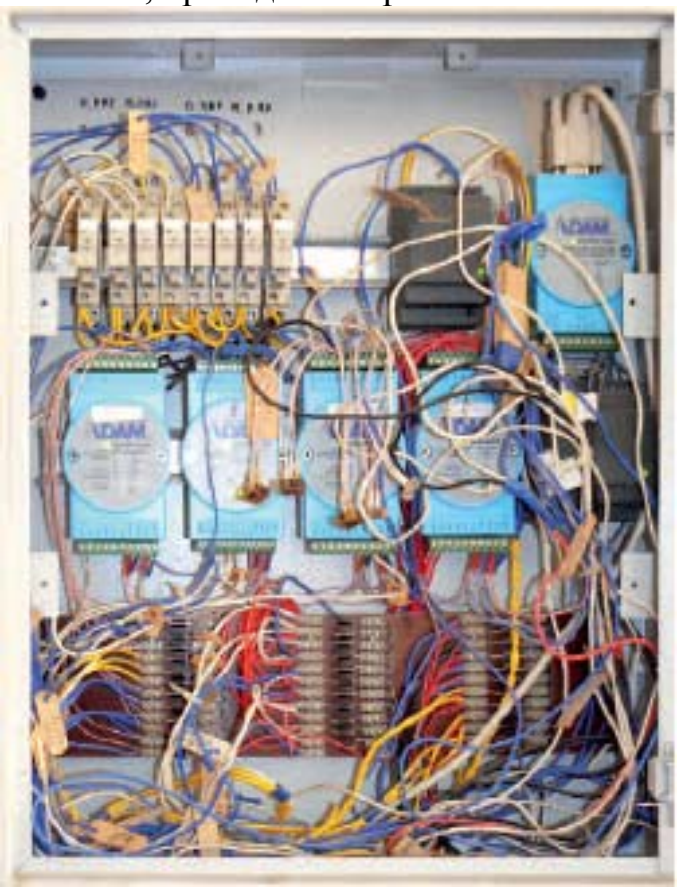


**Рис. 7.21. Шкаф управления автоклавами**

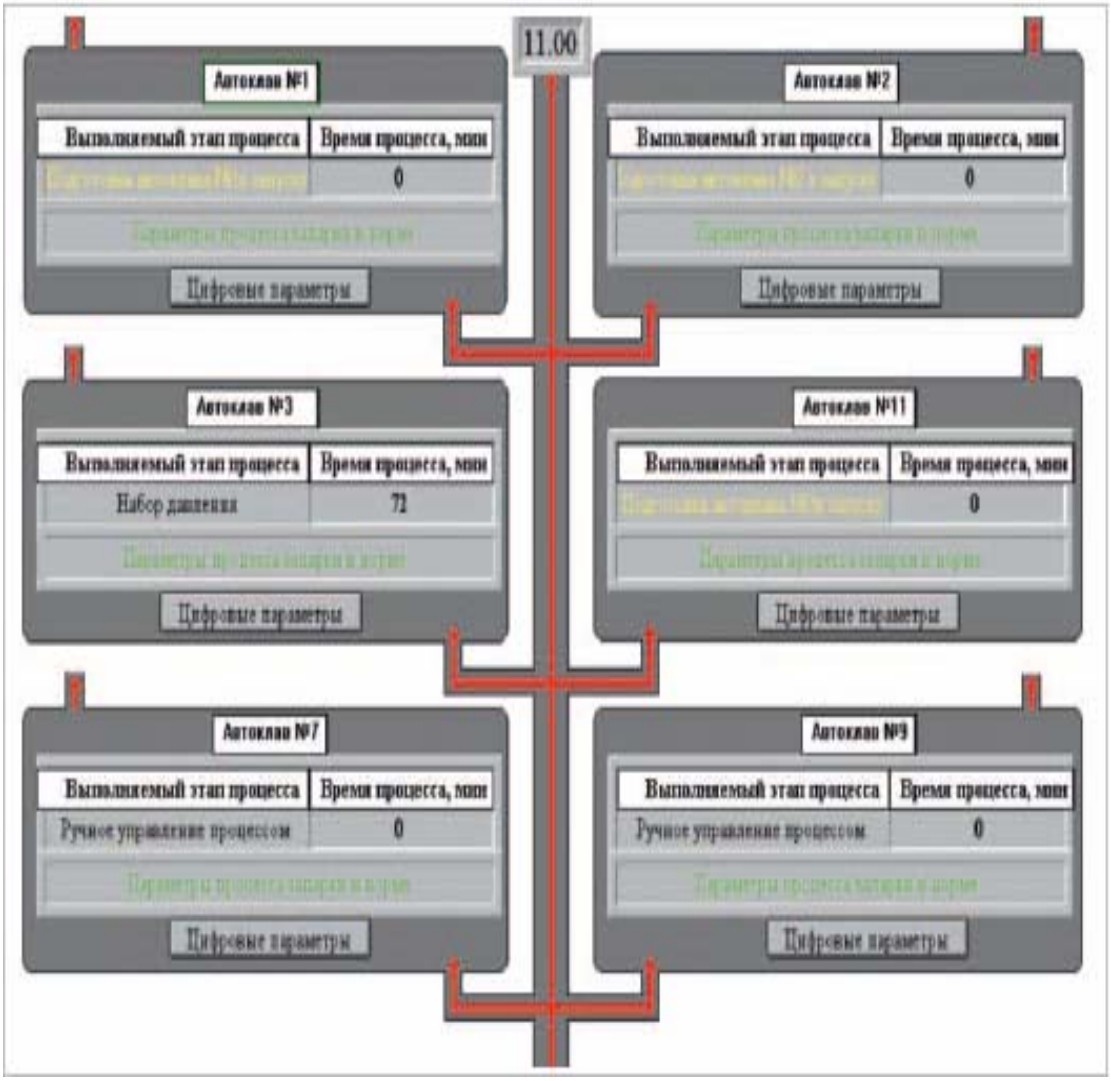



**Рис. 7.22. Экранная форма состояния автоклавов**

В качестве управляющей используется программа ADAMView фирмы Advantech.

Шесть автоклавов объединены в группу, управление ими осуществляется с одного компьютера. Состояние процессов во всех шести автоклавах, подключённых к компьютеру, контролируется с помощью общей экранной формы, показанной на рис. 7.22. Для каждого автоклава отображаются его номер, выполняемый этап процесса, время выполнения процесса, а также соответствующими сообщениями сигнализируется об отклонениях процесса пропарки от нормы. Из данной формы, нажав кнопку «Цифровые параметры» в поле определённого автоклава, можно перейти на одноимённую форму контроля и управления процессом пропарки выбранного автоклава (рис. 7.23).

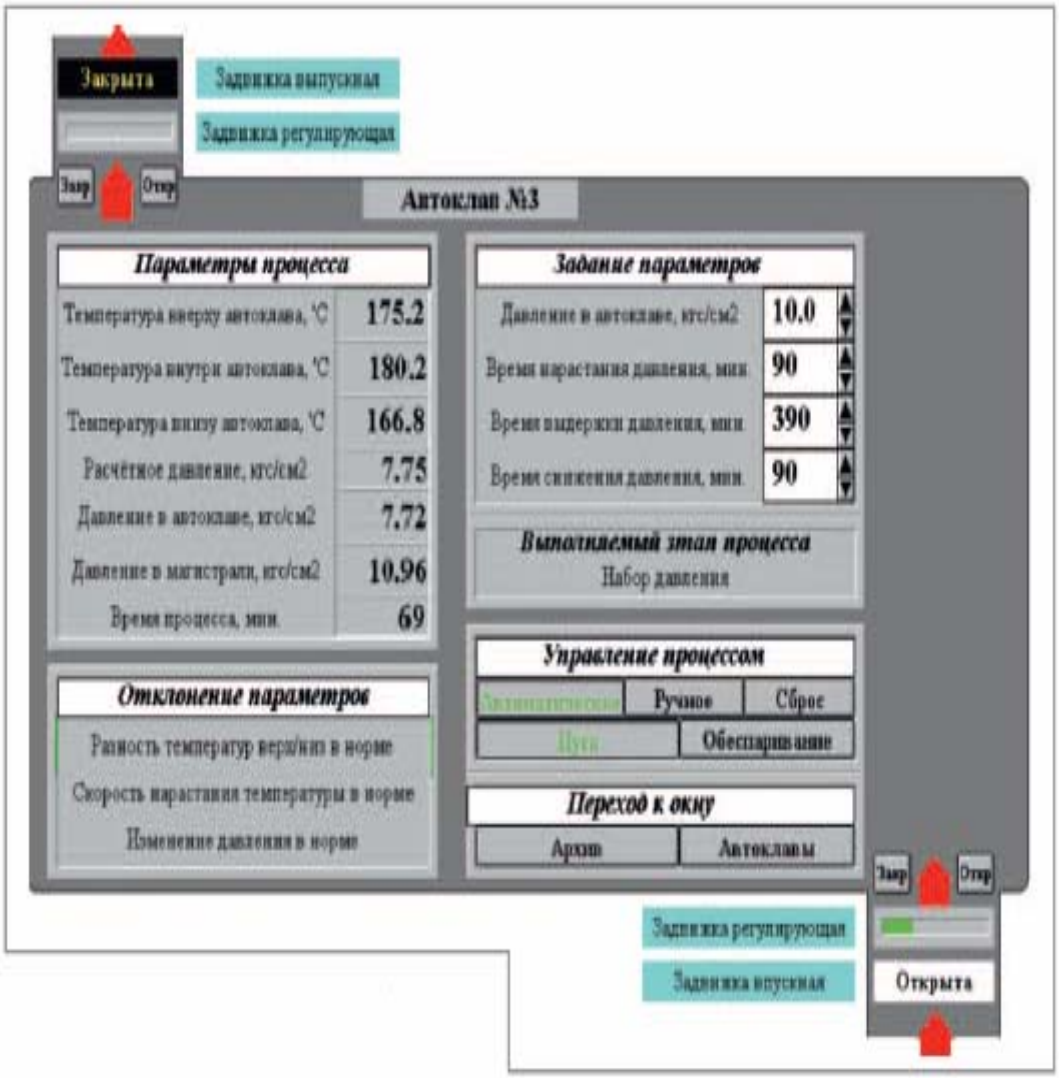



**Рис. 7.23. Экранная форма «Цифровые параметры»**

В разделе «Задание параметров» экранной формы конкретного автоклава оператором устанавливаются давление на этапе выдержки с шагом 0,1 кгс/см$^2$, время набора, выдержки и снижения давления с шагом 1 минута.

В разделе «Параметры процесса» отображаются текущие значения следующих показателей:

- температура вверху, внутри и внизу автоклава;
- расчётное и текущее давление в автоклаве в данный момент времени;
- давление в магистрали острого пара;
- время процесса.

В разделе «Выполняемый этап процесса» высвечивается название текущего этапа автоклавной обработки кирпича.

Раздел «Отклонение параметров» на этапе набора давления содержит информацию о соответствии норме текущих значений разности температуры вверху и внизу автоклава, скорости нарастания температуры и изменения давления. Если разность температуры вверху и внизу автоклава превышает 45°С, то выводится мигающее красным цветом сообщение «Разность температур выше нормы». Если скорость нарастания температуры превышает 1,5°С в минуту, то выводится мигающее красным цветом сообщение «Скорость нарастания температуры выше нормы». Если нарастание давления в автоклаве меньше 0,06 кгс/см$^2$/мин, то выводится мигающее красным цветом сообщение «Нарастание давления ниже нормы».

При любом отклонении контролируемых параметров от нормы выдаётся также звуковое сообщение «Отклонение параметров от нормы».

На экранной форме автоклава показаны также состояние задвижек безопасности острого пара и задвижки безопасности мятого пара в графическом виде с соответствующей надписью («Открыто», «Переключение», «Закрыто») и положение регулирующих задвижек острого и мятого пара.

В разделе «Управление процессом» возможен выбор автоматического или ручного режима. При выборе ручного управления необходимо нажать кнопку «Ручное». В окне «Выполняемый этап процесса» отобразится надпись «Ручное управление процессом» и появится возможность управлять положением регулирующих задвижек острого пара и мятого пара с помощью соответствующих кнопок «Закр» и «Откр». Для выбора автоматического управления необходимо нажать кнопку «Автоматическое», а затем кнопку «Пуск». Если задвижка безопасности острого пара ЗБОП открыта, а задвижка безопасности мятого пара ЗБМП закрыта, то начинается процесс пропарки. При другом состоянии задвижек безопасности выдаётся звуковое сообщение «Проверьте состояния задвижек безопасности».

После набора давления в течение заданного времени процесс пропарки переходит к этапу выдержки давления, что отображается надписью «Выдержка давления» в окне «Выполняемый этап процесса». Заданное значение давления поддерживается с точностью ±0,05 кгс/см$^2$. Если отклонение больше этого значения, что в большинстве случаев обусловлено снижением давления в подводящей магистрали острого пара, выводится сообщение «Снижение давления ниже нормы» и выдаётся звуковое оповещение «Отклонение параметров от нормы».

После окончания этапа выдержки давления выводится сообщение «Переход к снижению давления» и выдаётся звуковое сообщение «Внимание! Этап выдержки давления закончен. Закройте впускную и откройте выпускную задвижки безопасности». Оператор закрывает впускную и открывает выпускную задвижки безопасности и нажимает кнопку «Обеспаривание». После этого выводится сообщение «Этап снижения давления» и начинается снижение давления в течение заданного времени. После окончания этапа обеспаривания выводится текстовое сообщение «Процесс пропарки закончен» и звуковое оповещение «Процесс пропарки закончен».

Из формы «Цифровые параметры» оператор, нажав кнопку «Автоклавы», может вызвать форму, на которой отображаются все подключённые к компьютеру автоклавы и протекающие в них процессы (рис. 7.22). При нажатии кнопки «Архив» высвечивается форма «Текущий архив» (рис. 7.24).

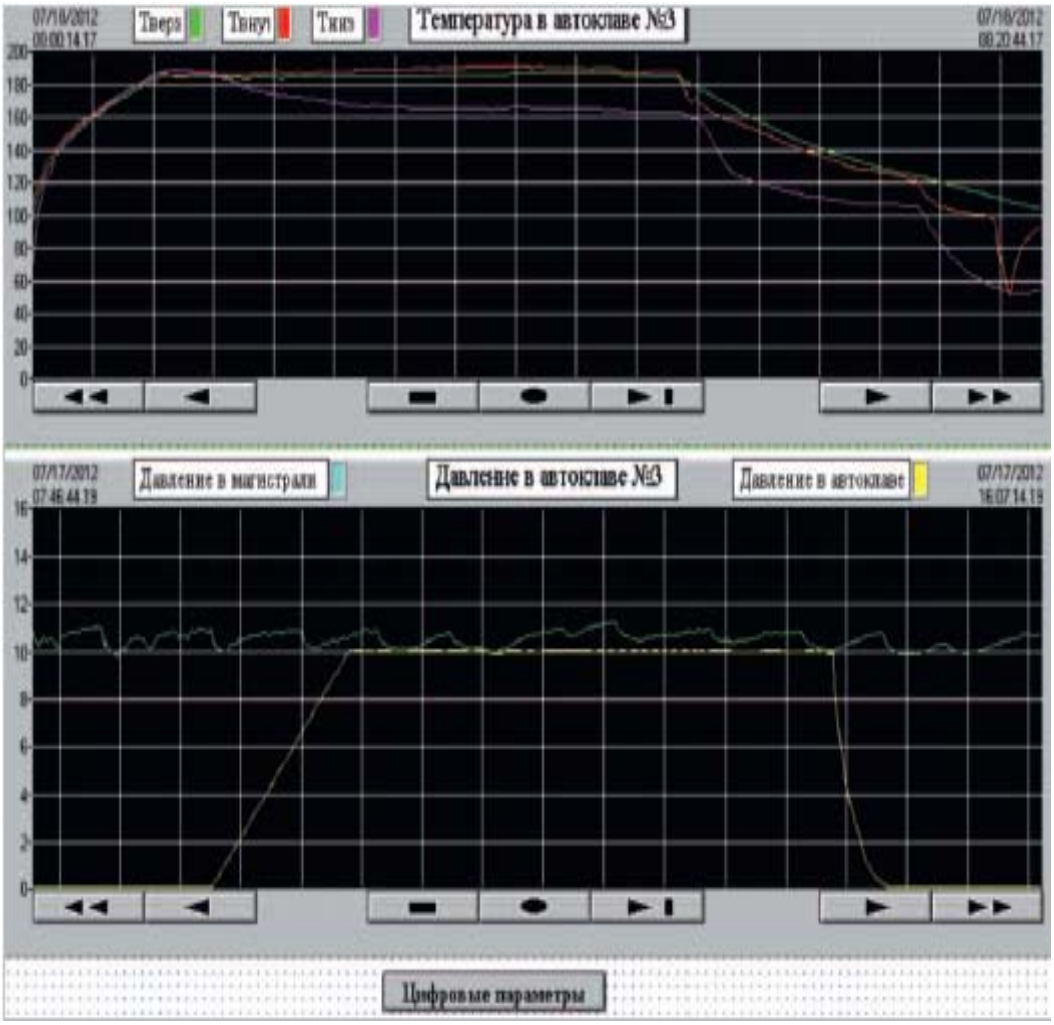



**Рис. 7.24. Экранная форма текущего архива**

На форме «Текущий архив» в верхнем окне показано изменение температуры вверху, внутри и внизу автоклава, а в нижнем окне — изменение давления в автоклаве и в магистрали подачи острого пара. Информация на форме «Текущий архив» позволяет качественно оценить процесс автоклавной обработки. Для более точной оценки параметров была разработана программа Graph (рис. 7.25). В окне этой программы могут отображаться значения давления в магистрали подачи острого пара и в автоклаве, а также температуры вверху, внутри и внизу автоклава. Для выбора отображаемых параметров необходимо щелчком мыши поставить галочку в окошке с названием параметра. Для точной оценки параметров в определённый момент времени нужно щёлкнуть левой кнопкой мыши, и в окне экранной формы появится вертикальный маркер. В окнах, расположенных внизу под соответствующей надписью, высветятся значения параметров процесса в точке пересечения вертикального маркера с соответствующей зависимостью, а в окне «Время» отобразится время получения этих значений (время оценки параметров процесса). Вертикальный маркер можно перемещать с помощью мыши в заданную временную точку процесса. Для удобства анализа можно изменять масштаб графиков по оси X и по оси Y.

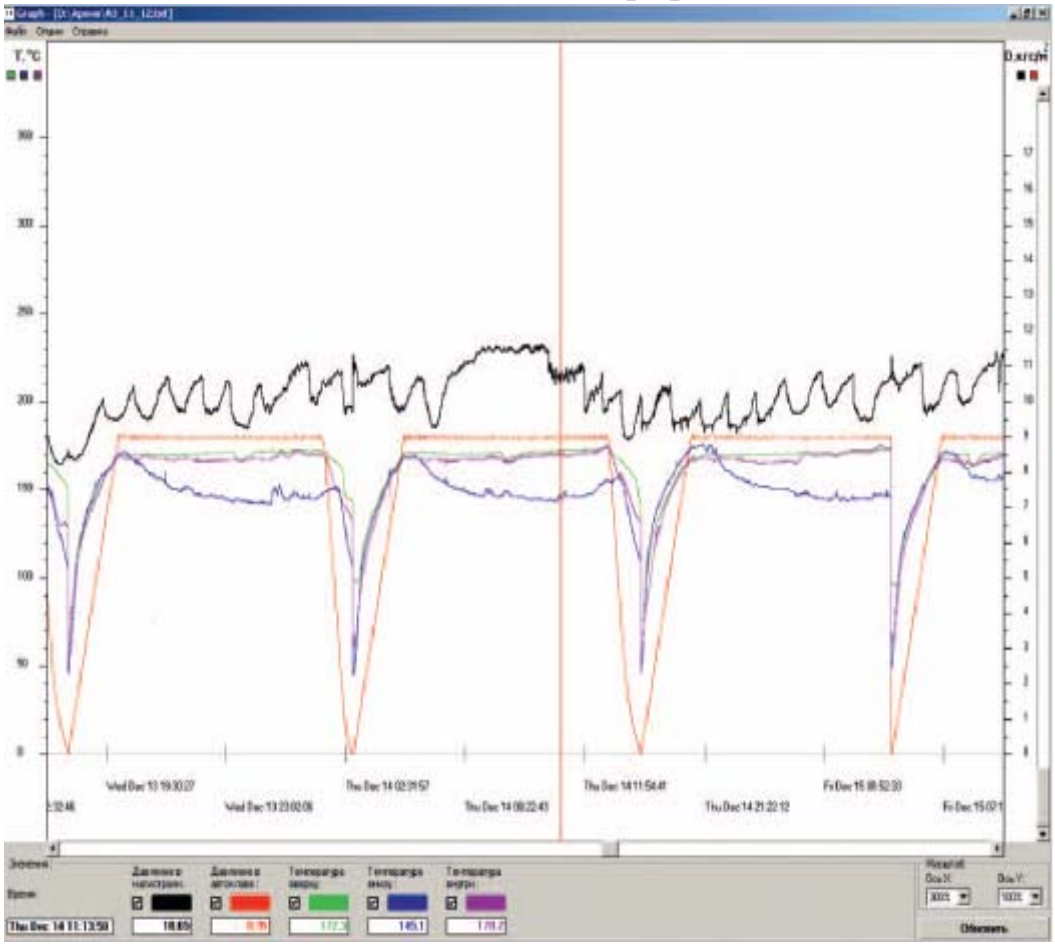


**Рис. 7.25. Экранная форма программы Graph**

Внедрение разработанной системы было начато в 2005 году на Рязанском заводе силикатного кирпича в условиях действующего производства [21]. В связи с этим подключение автоклавов осуществлялось поочередно. К концу 2008 года было подключено 10 автоклавов, управление которыми производилось с двух компьютеров. В настоящее время проводятся работы по дальнейшему расширению системы на описанных принципах до обслуживания 12 автоклавов [21].

Опыт создания и эксплуатации системы показал правильность выбранных решений, которые позволили автоматизировать процесс обработки силикатного кирпича. Внедрение автоматизированной системы привело к повышению качества силикатного кирпича на основе появившейся возможности более точного соблюдения технологических режимов и параметров, а также к росту энергетической эффективности обработки кирпича за счёт снижения потребления пара.

# ПРИЛОЖЕНИЕ
# УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

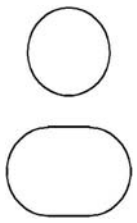
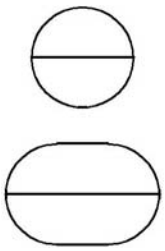
Данный стандарт (ГОСТ 21.404-85) устанавливает условные обозначения приборов, средств автоматизации и линий связи, применяемых при выполнении схем автоматизации технологических процессов, разрабатываемых при строительстве предприятий, зданий и сооружений всех отраслей промышленности и народного хозяйства.

## Условные обозначения

Графические обозначения

Графические обозначения приборов, средств автоматизации и линий связи должны соответствовать приведенным в таблице 1.

Таблица 1

| Наименование | Обозначение |
|---|---|
| Прибор, устанавливаемый по месту (вне щита): а) основное обозначение<br>б) допускаемое обозначение |  |
| Прибор, устанавливаемый на щите (пульте):<br>а) основное обозначение<br>б) допускаемое обозначение |  |
| Исполнительный механизм. Общее обозначение | |

| Окончание таблицы 1 | |
|---|---|
| Исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала:<br>а) открывает регулирующий орган<br>б) закрывает регулирующий орган<br>в) оставляет регулирующий орган в неизменном положении | |
| Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом<br>Примечание: обозначение может применяться с любым из дополнительных знаков, характеризующих положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала | Н |
| Линии связи. Общее обозначение | |
| Пересечение линий связи без соединения друг с другом | |
| Пересечение линий связи с соединением между собой | |

Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов изображают сплошной тонкой линией, соединяющей технологический трубопровод или аппарат с прибором (рис. 1а). При необходимости указания конкретного места расположения отборного устройства (внутри контура технологического аппарата) его изображают кружком диаметром 2 мм (рис. 1б):

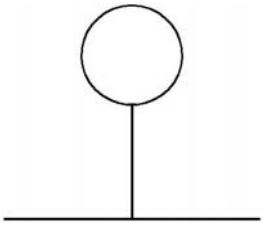


Рис. 1а

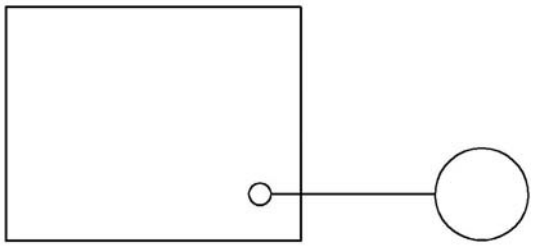


Рис. 1б

Буквенные обозначения

Основные буквенные обозначения измеряемых величин и функциональных признаков приборов должны соответствовать приведенным в таблице 2.

Таблица 2

| Обозначение | Основное обозначение измеряемой величины | Дополнительное обозначение, уточняющее измеряемую величину | Отображение информации | Формирование выходного сигнала | Дополнительное обозначение |
|---|---|---|---|---|---|
| *1* | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *A* | + | - | Сигнализация | - | - |
| *B* | + | - | - | - | - |
| *C* | + | - | - | Автоматическое регулирование, управление | - |
| *D* | Плотность | Разность, перепад | - | - | - |
| *E* | Электрическая величина | - | + | - | - |
| *F* | Расход | Соотношение, дробь | - | - | - |
| | | - | + | - | - |

| Продолжение таблицы 2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *G* | Размер, положение, перемещение | | | | |
| *H* | Ручное воздействие | - | - | - | Верхний предел измеряемой величины |
| *I* | + | - | Показание | - | - |
| *J* | + | Автоматическое переключение, обегание | - | - | - |
| *K* | Время, временная программа | - | - | + | - |
| *L* | Уровень | - | - | - | Нижний предел измеряемой величины |
| *M* | Влажность | - | - | - | - |
| *N* | + | - | - | - | - |
| *O* | + | - | - | - | - |
| *P* | Давление, Разрежение | - | - | - | - |
| *Q* | Величина, характеризующая качество: состав, концентрация и т.д. | Интегрирование, суммирование по времени | - | + | - |
| *R* | Радиоактивность | - | Регистрация | - | - |

| Окончание таблицы 2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *S* | Скорость, частота | - | - | Включение, отключе-ние, пере-ключение, блокировка | - |
| *T* | Температура | - | - | + | - |
| *U* | Несколько разнородных измеряемых величин | - | - | - | - |
| *V* | Вязкость | - | + | - | - |
| *W* | Масса | - | - | - | - |
| *X* | Нерко-комендуемая резервная буква | - | - | - | - |
| *Y* | + | - | - | + | - |
| *Z* | + | - | - | + | - |

Примечание: Буквенные обозначения, отмеченные знаком «+», являются резервными, отмеченные знаком «-» – не используются.

Дополнительные буквенные обозначения, применяемые для указания дополнительных признаков приборов, преобразователей сигналов и вычислительных устройств, приведены в табл. 4.

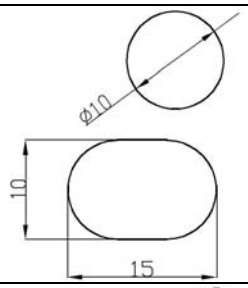
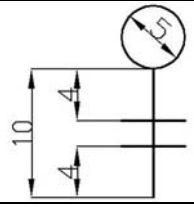
Размеры условных обозначений

Размеры условных графических обозначений приборов и средств автоматизации приведены в таблице 3.

Условные графические обозначения на схемах выполняют сплошной толстой линией, а горизонтальную разделительную черту внутри графического обозначения и линии связи – сплошной тонкой линией по ГОСТ 2.303.

Шрифт буквенных обозначений принимают по ГОСТ 2.304 равным 2,5 мм.

Таблица 3

| Наименование | Обозначение |
|---|---|
| Прибор:<br>а) основное обозначение<br><br>б) допускаемое обозначение |  |
| Исполнительный механизм |  |

**Правила построения условных обозначений**

Настоящий стандарт устанавливает два метода построения условных обозначений: а) упрощенный и б) развернутый.

При упрощенном методе построения приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции, например, контроль, регулирование, сигнализацию и управление, изображают одним условным обозначением. При этом первичные измерительные преобразователи и всю вспомогательную аппаратуру на схеме не изображают.

При развернутом методе построения каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект средств автоматизации, указывают отдельным условным обозначением.

Условные обозначения приборов и средств автоматизации, применяемые в схемах, включают графические, буквенные и цифровые обозначения. В верхней части графического обозначения наносят буквенные обозначения измеряемой величины и функционального признака прибора, определяющего его назначение. В нижней части графического обозначения наносят цифровое (позиционное) обозначение прибора или комплекта средств автоматизации.

Порядок расположения букв в буквенном обозначении принимают следующим: основное обозначение измеряемой величины; дополнительное

(уточняющее) обозначение измеряемой величины; обозначение функционального признака прибора.

При построении обозначений комплектов средств автоматизации первая буква в обозначении каждого входящего в комплект прибора или устройства (кроме устройств ручного управления) является наименованием измеряемой комплектом величины.

Буквенные обозначения устройств, выполненных в виде отдельных блоков и предназначенных для ручных операций, независимо от того, в состав какого комплекта они входят, должны начинаться с буквы *H*.

Порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков приборов принимают с соблюдением последовательности обозначений: *I, R, C, S, A*.

При построении буквенных обозначений указывают не все функциональные признаки прибора, а только те, которые используются в данной схеме.

Букву *A* применяют для обозначения функции «сигнализация» независимо от того, вынесена ли сигнальная аппаратура на какой-либо щит или для сигнализации используются лампы встроенные в прибор.

Букву *S* применяют для обозначения контактного устройства прибора, используемого только для включения, отключения, переключения, блокировки. При применении контактного устройства прибора для включения, отключения и одновременно для сигнализации в обозначении прибора используют обе буквы *S* и *A*.

Предельные значения измеряемых величин, по которым осуществляются, например, включение, отключение, блокировка, сигнализация, допускается конкретизировать добавлением букв *H* и *L*. Эти буквы наносят справа от графического обозначения.

При необходимости конкретизации измеряемой величины справа от графического обозначения прибора допускается указывать наименование или символ этой величины.

Для обозначения величин, не предусмотренных данным стандартом, допускается использовать резервные буквы. Применение резервных букв должно быть расшифровано на схеме.

Подвод линий связи к прибору изображают в любой точке графического обозначения (сверху, сбоку, снизу). При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях связи наносят стрелки.

Принцип построения условного изображения приведен на рис. 2.

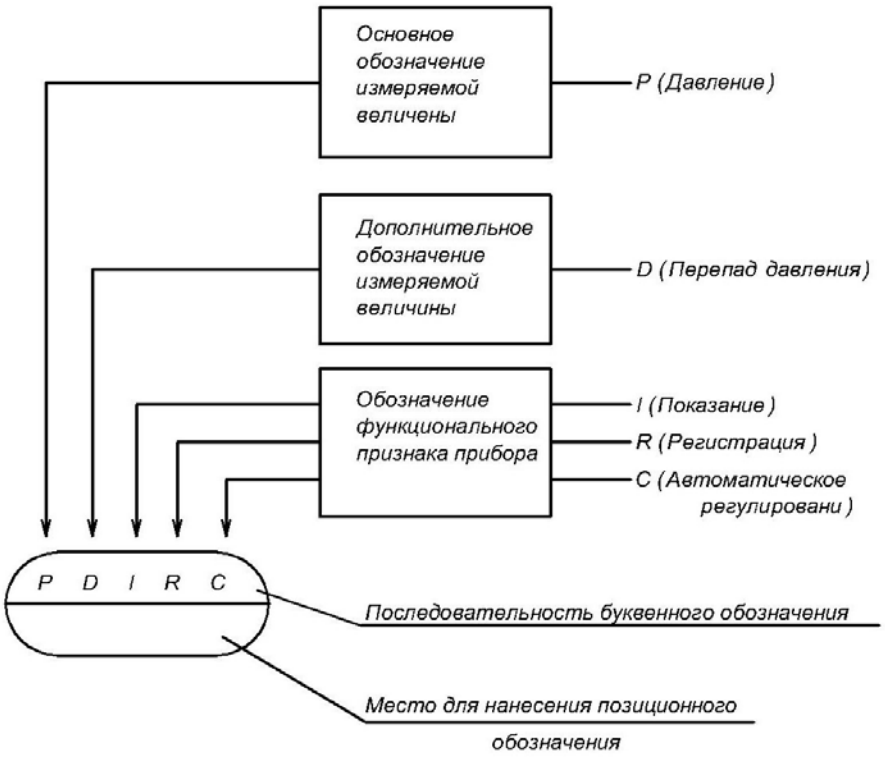



**Рис. 2. Принцип построения условного обозначения прибора**

Таблица 4

| Наименование | Обозначение | Назначение |
|---|---|---|
| Чувствительный элемент | *E* | Устройства, выполняющие первичное преобразование: преобразователи термоэлектрические, термометры сопротивления, датчики пирометров, сужающие устройства расходомеров и т.п. |
| Дистанционная передача | *T* | Приборы бесшкальные с дистанционной передачей сигнала: манометры, дифманометры, манометрические термометры |
| Станция управления | *K* | Приборы, имеющие переключатель для выбора вида управления и устройство для дистанционного управления |
| Преобразование, вычислительные функции | *Y* | Для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств |

Дополнительные буквенные обозначения

Дополнительные буквенные обозначения, отражающие функциональные признаки приборов, приведены в таблице 4.

Дополнительные буквенные обозначения, применяемые для построения преобразователей сигналов, вычислительных устройств, приведены в таблице 5.

Порядок построения условных обозначений с применением дополнительных букв принимают следующим: основное обозначение измеряемой величины, а затем одна из дополнительных букв (*E, T, K* или *Y*).

Таблица 5

| Наименование | Обозначение |
|---|---|
| 1. Род энергии сигнала: | |
| электрический | *E* |
| пневматический | *P* |
| гидравлический | *G* |
| 2. Виды форм сигнала: | |
| аналоговый | *A* |
| дискретный | *D* |
| 3. Операции, выполняемые вычислительным устройством: | |
| суммирование | $\sum$ |
| умножение сигнала на постоянный коэффициент *k* | *k* |
| перемножение двух и более сигналов | $\times$ |
| деление сигналов друг на друга | : |
| возведение величины сигнала *f* в степень *n* | $f^n$ |
| извлечение из величины сигнала корня степени *n* | $\sqrt[n]{f}$ |
| логарифмирование | lg |
| дифференцирование | $dx/dt$ |
| интегрирование | $\int$ |
| изменение знака сигнала | x(-1) |
| ограничение верхнего значения сигнала | max |
| ограничение нижнего значения сигнала | min |
| 4. Связь с вычислительным комплексом: | |
| передача сигнала на ЭВМ | $B_1$ |
| вывод информации с ЭВМ | $B_0$ |

При построении условных обозначений сигналов, вычислительных устройств надписи, определяющие вид преобразования или операции, осуществляемые вычислительным устройством, наносят справа от графического изображения прибора.

ГОСТы, применяемые при составлении рабочей документации.

При проектировании систем автоматизации следует руководствоваться следующими государственными стандартами:

ГОСТ 2.701-84 ЕСКД. Схемы и типы. Общие требования к выполнению.

ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем.

ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.

ГОСТ 2.722-69 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические.

ГОСТ 2.784-70. Условные цифровые обозначения трубопроводов для жидкостей и газов.

ГОСТ 21.110-95 СПДС. Правила выполнения спецификации оборудования, изделий и материалов.

ГОСТ 21.404-85 СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах.

ГОСТ 21.614-88 СПДС. Изображения условные графические электрооборудования и проводок на планах.

ГОСТ 34.201-89. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем.

## Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации

Условные обозначения наиболее распространенных датчиков, приборов и средств автоматизации приведены в таблице 6.

Таблица 6

| № | Обозначение | Наименование |
|---|---|---|
| 1 | TE | Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту.<br>Пример: преобразователь термоэлектрический (термопара), термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра, датчик пирометра и т.п. |
| 2 | TI | Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту.<br>Пример: термометр ртутный (или спиртовый), термометр манометрический и т.п. |
| 3 | TI | Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите.<br>Пример: милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т.п. |
| 4 | TT | Прибор для измерения температуры бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.<br>Пример: термометр манометрический бесшкальный, с пневмо- или электрической дистанционной передачей |
| 5 | TR | Прибор для измерения температуры одноточечный, регистрирующий, установленный на щите.<br>Пример: самопишущие милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т.п. |
| 6 | TJR | Прибор для измерения температуры с автоматическим обегающим устройством, регистрирующий, установленный на щите.<br>Пример: многоточечные самопишущий потенциометр, мост автоматический и т.п. |
| 7 | TRC | Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите.<br>Пример: любой самопишущий регулятор температуры (термометр манометрический, милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический |
| 8 | TC | Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту.<br>Пример: дилатометрический регулятор температуры |
| 9 | TRK TC | Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите.<br>Пример: вторичный прибор и регулирующий блок системы “Старт” |
| 10 | TS | Прибор для измерения температуры бесшкальный с контактным устройством, установленный по месту.<br>Пример: температурное реле. |

| | | |
|---|---|---|
| 11 | HC | Байпасная панель дистанционного управления, установленная на щите. |
| 12 | HS | Переключатель электрических цепей измерения (управления) или переключатель для газовых линий, установленный на щите. |
| 13 | PI | Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, установленный по месту.<br>Пример: любой показывающий манометр, дифманометр, тягомер, напоромер, вакуумметр и т.п. |
| 14 | PDI | Прибор для измерения перепада давлений показывающий, установленный по месту.<br>Пример: дифманометр показывающий |
| 15 | PT | Прибор для измерения давления (разрежения) бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.<br>Пример: манометр (дифманометр) бесшкальный с пневмо- или электропередачей |
| 16 | PR | Прибор для измерения давления (разрежения), установленный на щите.<br>Пример: манометр самопишущий или любой вторичный прибор для регистрации давления. |
| 17 | PS | Прибор для измерения давления (разрежения) с контактным устройством, установленный по месту.<br>Пример: реле давления |
| 18 | PIS | Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, с контактным устройством, установленный по месту.<br>Пример: электроконтактный манометр, вакуумметр и т.п. |
| 19 | PC | Регулятор давления, работающий без использования постороннего источника энергии (регулятор давления прямого действия) “до себя”. |
| 20 | FE | Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту. Например, диафрагма, сопло, труба Вентури, датчик индукционного или ультразвукового расходомера и т.п. |
| 21 | FT | Прибор для измерения расхода бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.<br>Пример: дифманометр (или ротаметр) бесшкальный с пневмо- или электрической дистанционной передачей. |
| 22 | FFR | Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите.<br>Пример: любой вторичный прибор для регистрации соотношения расходов |
| 23 | FI | Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту. Пример: дифманометр (ротаметр) показывающий |

| | | |
|---|---|---|
| 24 | FQI | Прибор для измерения расхода интегрирующий, установленный по месту. Пример: любой бесшкальный счетчик-расходомер с интегратором |
| 25 | FI FQI | Прибор для измерения расхода показывающий, интегрирующий, установленный по месту.<br>Пример: показывающий дифманометр с интегратором |
| 26 | FQIS | Прибор для измерения расхода интегрирующий, с устройством выдачи сигнала после прохождения заданного количества вещества, установленный по месту.<br>Пример: счетчик-дозатор |
| 27 | LE | Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения уровня, установленный по месту. Пример: датчик емкостного уровнемера. |
| 28 | LI | Прибор для измерения уровня показывающий, установленный по месту.<br>Пример: манометр (дифманометр), используемый для измерения уровня. |
| 29 | LSA H | Прибор для измерения уровня, с контактным устройством, сигнализирующий, установленный по месту.<br>Пример: реле уровня, используемое для блокировки и сигнализации верхнего уровня |
| 30 | LT | Прибор для измерения уровня бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.<br>Пример: уровнемер бесшкальный, с пневмо- или электропередачей |
| 31 | LCS H | Прибор для измерения уровня бесшкальный, регулирующий, с контактным устройством, установленный по месту. Например: электрический регулятор-сигнализатор уровня. Буква Н в данном примере означает блокировку по верхнему уровню. |
| 32 | LIA H L | Прибор для измерения уровня показывающий, с контактным устройством, установленный на щите.<br>Пример: вторичный показывающий прибор с сигнальным устройством. Буквы Н и L означают сигнализацию верхнего и нижнего уровней. |
| 33 | DT | Прибор для измерения плотности раствора, бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.<br>Пример: датчик плотномера с пневмо- или электропередачей |
| 34 | GI | Прибор для измерения размеров, показывающий, установленный по месту.<br>Пример: показывающий прибор для измерения толщины стальной ленты |
| 35 | EI | Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту. |

| | | |
|---|---|---|
| 36 | KS | Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите.<br>Пример: командный электропневматический прибор (КЭП), многоцепное реле времени. |
| 37 | MR | Прибор для измерения влажности регистрирующий, установленный на щите.<br>Пример: вторичный прибор влагомера. |
| 38 | QE pH | Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения качества продукта, установленный по месту. Пример: датчик pH-метра. |
| 39 | QI $O_2$ | Прибор для измерения качества продукта, показывающий, установленный по месту.<br>Пример: газоанализатор показывающий, для контроля содержания кислорода в дымовых газах. |
| 40 | QRC $H_2SO_4$ | Прибор для измерения качества продукта регистрирующий, регулирующий, установленный на щите.<br>Пример: вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе. |
| 41 | RIA α,β | Прибор для измерения радиоактивности показывающий, с контактным устройством, установленный по месту.<br>Пример: прибор для показания и сигнализации предельно допустимых концентраций α- и β- частиц. |
| 42 | SR | Прибор для измерения скорости вращения привода, регистрирующий, установленный на щите.<br>Пример: вторичный прибор тахогенератора. |
| 43 | UR U=f(F,P) | Прибор для измерения нескольких разнородных величин регистрирующий, установленный по месту.<br>Пример: самопишущий дифманометр-расходомер с дополнительной записью давления. Надпись, расшифровывающая измеряемые величины, наносится справа от прибора. |
| 44 | VI | Прибор для измерения вязкости раствора показывающий, установленный по месту.<br>Пример: вискозиметр показывающий |
| 45 | WIA | Прибор для измерения массы продукта показывающий, с контактным устройством, установленный по месту. Например, устройство электронно-тензометрическое, сигнализирующее |
| 46 | BS | Прибор для контроля погасания факела в печи бесшкальный, с контактным устройством, установленный на щите.<br>Пример: вторичный прибор запально-защитного устройства. Применение резервной буквы *B* должно быть оговорено на полях схемы |
| 47 | TY E/E | Преобразователь сигнала, установленный на щите. Входной сигнал электрический, выходной – также электрический.<br>Пример: преобразователь измерительный, служащий для преобразования ЭДС термопары в сигнал постоянного тока |

| | | |
|---|---|---|
| | | Окончание таблицы 6 |
| 48 | P/E PY | Преобразователь сигнала, установленный по месту. Входной сигнал – пневматический, выходной – электрический. |
| 49 | K FY | Вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения.<br>Например: умножитель на постоянный коэффициент *K* |
| 50 | NS | Пусковая аппаратура для управления электродвигателем (включение, выключение насоса; открытие, закрытие задвижки и т.д.)<br>Пример: контактор, магнитный пускатель и т.п. Применение резервной буквы *N* должно быть оговорено на полях схемы |
| 51 | H | Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления (включение, выключение двигателя; открытие, закрытие запорного органа, изменение задания регулятору), установленная на щите<br>Пример: кнопка, ключ управления, задатчик |
| 52 | HA | Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления, снабженная устройством для сигнализации, установленная на щите.<br>Пример: кнопка со встроенной лампочкой, ключ управления с подсветкой и т.п. |

## Условные цифровые обозначения трубопроводов для жидкостей и газов (ГОСТ 2.784-70)

Условные цифровые обозначения трубопроводов для жидкостей и газов приведены в таблице 7.

Таблица 7

| Наименование среды, транспортируемой по трубопроводу | Обозначение |
|---|---|
| Вода | -1-1- |
| Пар | -2-2- |
| Воздух | -3-3- |
| Азот | -4-4- |
| Кислород | -5-5- |
| Инертные газы: | |
| Аргон | -6-6- |
| Неон | -7-7- |
| Гелий | -8-8- |
| Криптон | -9-9- |
| Ксенон | -10-10- |
| Аммиак | -11-11- |
| Кислота (окислитель) | -12-12- |
| Щелочь | -13-13- |
| Масло | -14-14- |
| Жидкое горючее | -15-15- |
| Горючие и взрывоопасные газы: | |
| Водород | -16-16- |
| Ацетилен | -17-17- |
| Фреон | -18-18- |
| Метан | -19-19- |
| Этан | -20-20- |
| Этилен | -21-21- |
| Пропан | -22-22- |
| Пропилен | -23-23- |
| Бутан | -24-24- |
| Бутилен | -25-25- |
| Противопожарный трубопровод | -26-26- |
| Вакуум | -27-27- |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Энциклопедия кибернетики. Т. 1. – Киев, 1975. – 608 с.
2. Гордеев А.С. Основы автоматики: учебное пособие для вузов. – Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2006.
3. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Академия, 2010.
4. Цикерман Л.Я., Берлинер М.А. и др. Автоматизация производственных процессов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1972. – 316 с.
5. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 652 с.
6. Приборы и средства автоматизации. Каталог в 8-ми томах. – М.: Наутехлитиздат, 2003–2006.
7. Фарзане Н.Г., Ильясов Л.В., Алим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1989.
8. Бушуев С.Д., Михайлов В.С. Автоматика и автоматизация производственных процессов. – М.: Высшая Школа, 1990.
9. Сафиуллин Р.К., Кордончик Д.М. Основы автоматического регулирования и управления: учебное пособие. – Казань.: КГАСУ, 2010. – 94 с.
10. Сафиуллин Р.К. Основы автоматического регулирования. Методическое руководство для студентов строительных специальностей. – Казань: Полиграфкомбинат им. К. Якуба, 1982. – 32 с.
11. Компоненты автоматизации ОВЕН. Разработка и производство. Каталог продукции 2008/2009.
12. ОВЕН. Оборудование для автоматизации. Каталог 2012.
13. Гусев В., Бронин М., Кулешов А. Автоматизированная система контроля уровня и массы цемента в силосах готовой продукции цементных заводов. Современные технологии автоматизации (СТА). – № 3. – 2006.
14. Волков В., Ивайкин В., Лазько А., Кобелев А., Мечетин С. АСУ ТП цеха углеприема обогатительной фабрики «Сибирь». СТА. – № 3. – 2000.
15. Гусев В., Якимов И., Горбатенко Б. Система автоматизированного управления пневмотранспортом сыпучих продуктов. СТА. – № 2. – 2012.
16. Смирнов Ю. Система управления бетоносмесительной установкой. СТА. – № 1. – 2004.

17. Пархоменко А., Починчук Н., Шипицин С. Автоматизированная система управления технологическим процессом производства бетонных смесей. СТА. – № 1. – 2005.
18. Беляков Р., Ефимов Ю., Наранов К. АСУ ТП бетонного завода. СТА. – № 3. – 2006.
19. Смирнов Ю. Система управления тепловлажностной обработкой железобетонных изделий. СТА. – № 1. – 2005.
20. Морозов В. Автоматизированная система обжига керамических изделий. СТА. – № 3. – 2006.
21. Свиязов А., Шишканов С. Система автоматизации автоклавной обработки силикатного кирпича. СТА. – № 1. – 2013.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ …….. 3
ВВЕДЕНИЕ…….4
ГЛАВА 1. АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ…….. 5
1.1. Основные понятия и определения…….....5
1.2. Классификация автоматических устройств и систем……..… 6
1.3. Понятие об автоматическом контроле. Измерительные преобразователи, датчики, их основные характеристики……7
ГЛАВА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)……..8
2.1. Преобразователи активного сопротивления……. 8
2.2. Измерительные преобразователи температуры……11
2.3. Электромагнитные измерительные преобразователи……. 16
2.4. Пьезоэлектрические и емкостные преобразователи……18
2.5. Измерительные преобразователи влажности…….. 20
2.6. Фотоэлектрические преобразователи……27
2.7. Основные измерительные схемы……...28
2.8. Измерительные преобразователи давления……..34
2.9. Измерительные преобразователи расхода. Счетчики……...39
2.10. Измерительные преобразователи уровня сыпучих материалов и жидкостей……43
ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ……..45
3.1. Виды и задачи автоматического регулирования и управления...45
3.2. Основные свойства САР……..…46
3.3. Основные свойства объектов регулирования……48
3.4. Математическое описание САР. Преобразование Лапласа…….50
3.5. Динамические звенья и их характеристики……...51
3.6. Типовые динамические звенья……53
3.7. Схематическое представление САР……58
3.8. Устойчивость систем автоматического регулирования……61
3.9. Классификация автоматических регуляторов……65

ГЛАВА 4. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ……..73
4.1. Электромагнитные, магнитоэлектрические индукционные и электротепловые реле……73
4.2. Контакторы и магнитные пускатели……..75
4.3. Исполнительные механизмы и регулирующие органы……79
ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ……81
5.1. Автоматизация поточно-транспортных систем (конвейерных линий)…… ……..81
5.2. Автоматизация подъемно-транспортных систем ……..……. 83
ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ……88
6.1. Инженерный анализ автоматического контроля и управления технологическим процессом…….. 88
6.2. Автоматизация тепловой обработки железобетонных изделий в пропарочных камерах……89
6.3. Автоматизация бетоносмесительного узла (БСУ)……91
ГЛАВА 7.СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ……..97
7.1. Автоматизированная система контроля уровня и массы цемента в силосах готовой продукции …….…….97
7.2. Автоматизированная система управления (АСУ) пневмотранспортом сыпучих продуктов……... 102
7.3.АСУ бетоносмесительной установкой …… ……115
7.4. АСУ ТП производства бетонных смесей……..125
7.5. АСУ ТП бетонного завода……..135
7.6.АСУ тепловлажностной обработкой железобетонных изделий..143
7.7. АСУ процессом обжига керамических изделий…… 152
7.8. Система автоматизации процесса автоклавной обработки силикатного кирпича……...159
ПРИЛОЖЕНИЕ. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ……...168
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….……. 184

Сафиуллин Рафаиль Каримович

# ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Корректура автора