

# МарГТУ

Марийский государственный технический университет

---

В. В. БАГНЮК    А. Р. РОТТ

## АВТОМАТИКА

Учебное пособие

Йошкар-Ола  
МарГТУ  
2011

УДК 681.57

ББК 32.965

Б 14

**Рецензенты:**

кандидат технических наук, доцент МарГТУ *Д. В. Кожин*  
главный технолог ОАО «ММЗ» *А. В. Губин*

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета МарГТУ*

**Багнюк, В. В.**

Б 14      Автоматика: учебное пособие / В. В. Багнюк, А. Р. Ротт. –  
Йошкар-Ола: Марийский государственный технический универси-  
тет, 2011. – 108 с.

Представлены материалы, описывающие основные понятия автома-  
тики, технико-экономические показатели автоматизации технологических  
процессов, классификацию автоматических систем управления. Показаны  
технические и конструктивные особенности средств автоматизации.

Для студентов технических специальностей, изучающих дисциплины  
«Автоматика», «Управление техническими средствами», «Методы и техниче-  
ские средства измерений», «Автоматизация технологических процессов»,  
«Робототехника».

УДК 681.57

ББК 32.965

© Багнюк В. В., Ротт А. Р., 2011

© Марийский государственный  
технический университет, 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время важным направлением научно-технического прогресса является комплексная автоматизация, включающая в себя: переход от автоматизации станков, агрегатов, установок к автоматизации работы линий, участков, цехов и заводов в целом; создание автоматизированных систем управления предприятием (АСУП) и целыми отраслями (ОАСУ); расширение применения промышленных роботов и гибких автоматизированных производственных систем.

В настоящем учебном пособии раскрываются основные понятия автоматизации, приводятся технико-экономические показатели автоматизации технологических процессов. Подробно представлена классификация автоматических систем управления, описаны технические и конструктивные особенности технических средств применяемых при автоматизации технологических процессов. В конце каждой главы приведен перечень контрольных вопросов, призванных помочь студентам систематизировать изучаемый материал и организовать самостоятельную работу по его освоению.

Содержание и структура учебного пособия соответствуют программе изучения курса. Предназначено оно прежде всего для студентов III – V курсов технических специальностей, изучающих дисциплины «Автоматика», «Управление техническими системами», «Автоматизация производственных процессов» и т.д.

Авторы надеются, что данное издание даст возможность студентам глубже понять изучаемую дисциплину, а также в дальнейшем поможет будущим специалистам в профессиональной деятельности при разработке решений для автоматизации технологических процессов в сфере сельского хозяйства, машиностроения, транспорта и других технических и технологических сферах.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУП – автоматизированные системы управления производством  
АСУТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами  
АФЧХ – амплитудно фазочастотная характеристика  
ГСП – государственная система промышленных приборов и средств автоматизации  
ГЭП – гидроэлектрический преобразователь  
ИМ – исполнительный механизм  
КФ – корреляционная функция  
МО – математическое ожидание  
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство  
ОС – обратная связь  
ОУ – объект управления  
ПЗУ – постоянно запоминающее устройство  
ПИД-РЕГУЛЯТОР – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор  
ПИ-РЕГУЛЯТОР – пропорционально-интегральный регулятор  
ППЗУ – перепрограммируемое запоминающее устройство  
ПФ – передаточная функция  
РО – регулирующий орган  
САР – система автоматического регулирования  
СП – случайный процесс  
СР – система регулирования  
СтУ – станция управления  
СУ – система управления  
СФ – случайная функция  
СЭУ – система экстремального управления  
ТП – технологический процесс  
ТСА – технические средства автоматизации  
УУ – управляющее устройство  
ЦАС – цифровая автоматическая система  
ЭГП – электрогидравлический преобразователь

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматика – это область науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления, действующих без непосредственного участия человека.

Первые автоматические машины, работающие без участия человека, были созданы еще греческим ученым Героном Александрийским, жившим в I в. н. э. Существуют описания около 100 автоматов, известных в те древние времена, которые использовались, как правило, в развлекательных и религиозных целях.

В 1765 г. русским механиком И. И. Ползуновым был изобретен первый в мире промышленный регулятор, автоматически поддерживающий требуемый уровень воды в котле паровой машины. Предложенный им принцип регулирования по отклонению является одним из основных принципов построения различных автоматических систем.

Автоматизация технологических процессов характеризуется частичной или полной заменой человека-оператора специальными техническими средствами контроля и управления.

При внедрении автоматизации в различных сферах экономики повышается надежность и продлевается срок службы технологического оборудования, облегчаются и оздоравливаются условия труда, повышается его безопасность, при этом сокращаются затраты на единицу продукции и повышается ее качество.

Для современной техники характерны значительное усложнение задач управления и рост объемов обрабатываемой и передаваемой информации, определяющие принципиальный качественный скачок автоматизации – широкое применение средств вычислительной техники.

Основной задачей данного учебно-методического пособия является ознакомление студентов с основными понятиями автоматике, с классификацией автоматических систем управления, техническими и конструктивными особенностями технических средств, применяемых при автоматизации технологических процессов.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## 1.1. ВИДЫ И ФУНКЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Автоматизация технологических процессов – это совокупность средств и методов, предназначенных для реализации различных систем, которая дает возможность осуществлять управление технологическими процессами безличного участия человека либо с оставлением за человеком возможности принятия решений, являющихся наиболее ответственными.

В зависимости от функций, выполняемых специальными автоматическими устройствами, различают следующие основные *виды автоматизации*: автоматический контроль, автоматическую защиту, дистанционное и автоматическое управление, телемеханическое управление.

Автоматический контроль включает в себя автоматические сигнализацию, измерение, сортирование и сбор информации.

*Автоматическая сигнализация* предназначена для оповещения обслуживающего персонала о предельных или аварийных значениях каких-либо физических параметров, месте и характере нарушений ТП. Сигнальными устройствами служат лампы, звонки, сирены, специальные мнемонические указатели, а также другие световые и звуковые устройства.

*Автоматическое измерение* служит для измерения и передачи на специальные указательные или регистрирующие приборы значений физических величин, характеризующих ТП или работу машин. Обслуживающий персонал по показаниям приборов судит о качестве ТП и режиме работы машин и агрегатов.

*Автоматическое сортирование* предназначено для контроля и разделения продукции по размеру, массе, твердости, вязкости, а также другим показателям (например, сортировка зерна, яиц, фруктов, картофеля и т. п.).

*Автоматический сбор информации* необходим для получения информации о ходе ТП, качестве и количестве выпускаемой продукции и для дальнейшей обработки, хранения и выдачи информации обслуживающему персоналу.

Автоматическая защита представляет собой совокупность технических средств, которые при возникновении ненормальных или аварийных режимов либо прекращают контролируемый производственный процесс (например, отключают определенные участки электро-

установки при возникновении на них коротких замыканий), либо автоматически устраняют ненормальные режимы. Автоматическая защита тесно связана с автоматическим управлением и сигнализацией. Она воздействует на органы управления и оповещает обслуживающий персонал об осуществленной операции.

Автоматическая защита, выполненная на основе реле, получила название релейной. Ее применяют на электрических станциях, подстанциях, в электрических сетях и различных электроустановках.

*Устройства автоблокировки*, входящие в автоматическую защиту, в основном предназначены для предотвращения неправильных включений и отключений и ошибочных действий обслуживающего персонала; они предупреждают возможные повреждения и аварии.

*Объектом управления (ОУ)* или управляемым объектом называют отдельную совокупность элементов, в которой технологические процессы подвергаются целенаправленным воздействиям. К такой совокупности относят поле, теплицу, хранилище продукции, трактор, комбайн, растение, животное и т. п.

Объект управления и специальное управляющее устройство в этой совокупности образуют автоматическую систему управления (СУ). Новизной последней является автоматическая система регулирования, которую используют для автоматического поддержания каких-либо параметров в объекте на заданном уровне или изменения их по определенному закону. Автоматическое регулирование осуществляется управляющим устройством, которое называют *автоматическим регулятором*.

Если целенаправленное воздействие осуществляет человек, то такое управление называют *ручным*.

Дистанционное управление объединяет в себе методы и технические средства управления установками и различными объектами на расстоянии. Импульсы на управление (команды) подаются обслуживающим персоналом по линиям связи с помощью соответствующих кнопок, ключей и другой командной аппаратуры.

Телемеханика – область науки и техники, охватывающая теорию и технические средства автоматической передачи на расстояние команд управления и получения информации о состоянии ОУ. Телемеханические системы позволяют объединить в один ТП работу большого числа машин и установок, расположенных одна от другой на значительном расстоянии. В зависимости от назначения их принято разделять на системы телесигнализации *телеизмерения* и *телеуправления*.

Все рассмотренные выше понятия и системы автоматизации объединяют в новое научно-техническое направление, которое получило название технической кибернетики.

Кибернетика – наука об управлении сложными развивающимися системами и процессами, изучающая общие математические законы управления объектами различной природы.

В зависимости от степени автоматизации различают ручное, автоматизированное и автоматическое управление. При ручном управлении все функции управления выполняет человек-оператор. При автоматизированном управлении часть функций выполняет человек, а другую часть – автоматические устройства. При автоматическом управлении все функции управления выполняют автоматические устройства. В соответствии с этими понятиями принято разделять системы управления на автоматизированные и автоматические.

В современной автоматике системы управления разделяют на автоматизированные системы управления производством (АСУП) и технологическими процессами (АСУ ТП).

*АСУП* – это человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор, обработку и хранение информации, необходимой для оптимизации управления в различных сферах, главным образом в организационно-экономической деятельности человека, например управление хозяйственно-плановой деятельностью отрасли, предприятием, комплексом, территориальным регионом, т. е. управление системой сельскохозяйственных подразделений.

*Автоматизированная СУ ТП* – это тоже человеко-машинная система обеспечивающая автоматизированный сбор, хранение и обработку информации о ходе протекания ТП, а также выдачу управляющих воздействий на ТП в соответствии с принятым критерием управления. Обычно АСУ ТП охватывает отдельные цеха, животноводческие и птицеводческие фермы, хранилища, хозяйства в целом. АСУ ТП помогает диспетчеру и руководителю предприятия оперативно находить решения по оптимальному управлению производственным процессом, опираясь на показатели отдельных технологических операций.

*Автоматическая СУ ТП* представляет собой совокупность автоматических управляющих устройств и ОУ, взаимодействующих без непосредственного участия человека.

По степени автоматического управления производственными ТП различают частичную, комплексную и полную автоматизацию.

Частичная автоматизация распространяется только на отдельные производственные операции или установки. Она не освобождает человека от участия в производственном процессе, но существенно об-



легчает его труд. Примером может служить дистанционное управление электроприводами.

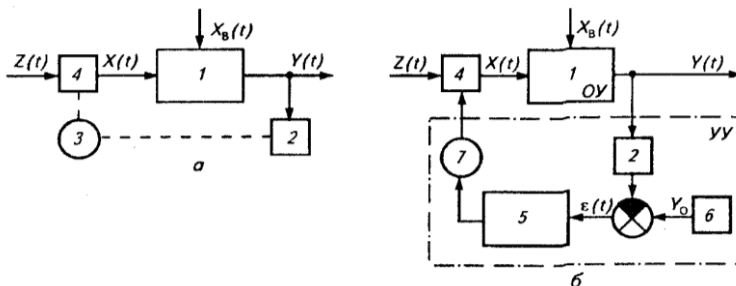
Комплексная автоматизация ТП означает автоматическое выполнение всего комплекса операций и установок по обработке материалов и их транспортированию по заранее заданным программам при помощи различных автоматических устройств, входящих в общую систему управления. В этом случае функции человека сводятся к наблюдению за ходом процесса, его анализу и изменению режима работы автоматических устройств с целью достижения наилучших технико-экономических показателей. В качестве примера можно привести управление послеуборочной очисткой и сушкой зерна, управление кормоприготовительными агрегатами.

Полная автоматизация, в отличие от комплексной, возлагает выполнение функций выбора и согласования режимов работы отдельных машин и агрегатов (как при нормальном режиме, так и в аварийных ситуациях) не на человека, а на специальные автоматические устройства. В этом случае все основные и вспомогательные установки способны работать в автоматическом режиме в течение длительного периода без непосредственного участия человека. За обслуживающим персоналом остаются функции периодического осмотра, профилактического ремонта и перестройки всей системы на новые режимы работы.

Опыт автоматизации промышленности показывает, что при частичной автоматизации затраты на средства автоматики составляют от 1 до 10% капитальных вложений на установку в целом, при комплексной – от 10 до 25 % и при полной – более 25 %. В сельском хозяйстве на средства автоматики и метрологические приборы расходуется менее 7%, хотя в теплицах они составляют 15...40 % общей стоимости технологического оборудования.

## 1.2. СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Целью управления ТП может быть: стабилизация некоторой физической величины, изменение ее по заданной программе или, в более сложных случаях, оптимизация некоторого обобщающего критерия: наибольшая производительность процесса наименьшая себестоимость продукта и т. д.



**Рис.1.1. Структурные схемы систем ручного (а) и автоматического (б) управления:** 1 – объект управления; 2 – измерительный прибор; 3 – оператор; 4 – регулирующий орган; 5 – управляющий элемент; 6 - задатчик; 7 – исполнительный механизм

В самом простом случае (рис. 1.1, а) управление ТП осуществляет оператор 3, который на основании своего опыта и ориентируясь по показаниям контрольно-измерительных приборов 2 оценивает ход процесса по выходным параметрам  $Y(t)$  и принимает меры воздействия  $X(t)$  с целью устранения влияния внешних возмущений  $X_b(t)$ , действующих на объект управления 1. Естественно, результаты ТП в этом случае зависят от квалификации и добросовестности оператора.

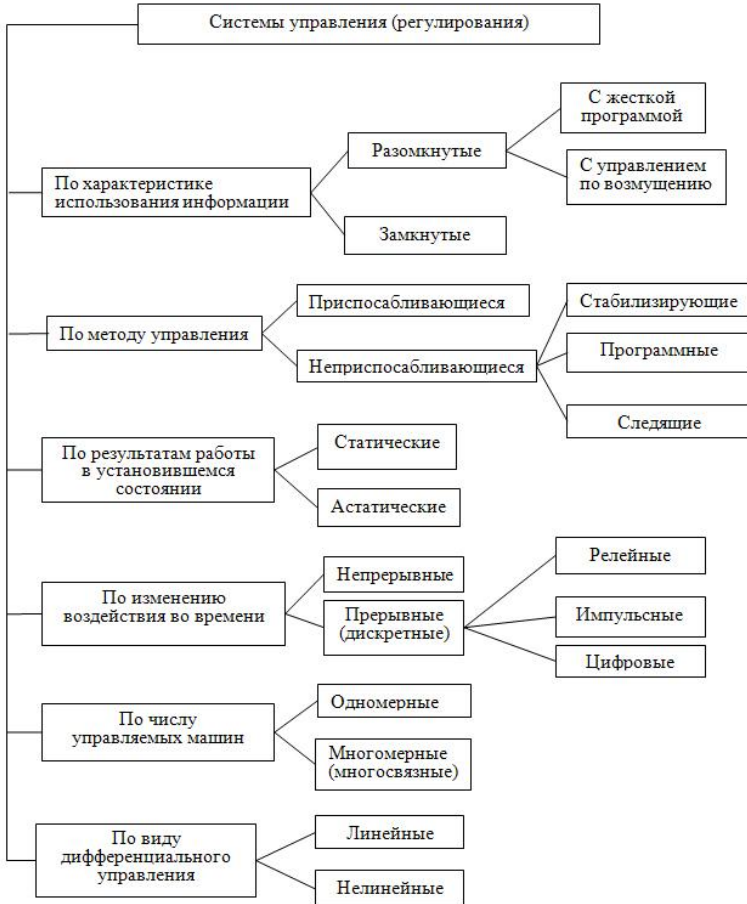
Структурные схемы автоматических СУ представляют в виде цепочки элементов, каждый из которых подвержен действию одного или нескольких входных воздействий, в результате чего изменяются выходные параметры этого элемента.

Обычно элементы обладают детектирующими свойствами, когда выходные величины не влияют на входные. Но возможны также случаи, когда выходные параметры воздействуют на входные. Это имеет место в том случае, когда элемент охвачен обратной связью или если такова физическая сущность протекающих в объекте процессов.

Структурные схемы автоматических СУ (рис. 1.1, б) в простейшем случае включают в себя два элемента: объект 1 управления (совместно с регулирующим органом 4) и управляющее устройство УУ (на рисунке обведено пунктиром). В схему УУ входят измерительный преобразователь (датчик) 2, измеряющий регулируемую величину и преобразующий ее в определенный сигнал определенной физической природы (электрической, механической и др.); задатчик 6; управляющий элемент 5, усиливающий и преобразующий отклонение Управляемой величины  $Y(t)$  от заданного значения  $Y_0$  в соответствии с заложенным в него алгоритмом; исполнительный механизм 7, выполняющий команду управляющего элемента 5 по изменению положения регулирующего органа 4, осуществляющего управление расходом вещества или энергии в ОУ.

На вход управляющего элемента (регулятора) 5 подается сигнал, по значению равный разности  $e(t)$  текущего значения управляемой величины  $Y(t)$  и ее заданного значения  $Y_0$ . Управляемая величина  $Y(t)$  находится под действием одного или нескольких возмущающих воздействий  $X_e(t)$ , часть которых может контролироваться.

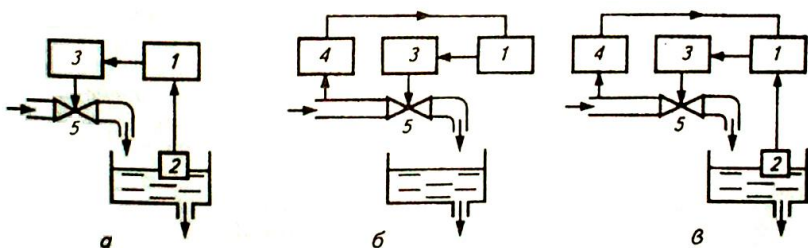
**Классификация автоматических СУ** возможна по различным признакам, например так, как это показано на рисунке 1.2.



**Рис. 1.2. Классификация автоматических систем управления (регулирования)**

Первый из признаков – **назначение информации**, в соответствии с которым автоматические СУ делят на замкнутые и разомкнутые.

*Замкнутые* системы используют текущую информацию о выходных величинах, определяют отклонение  $e(t)$  управляемой величины  $Y(t)$  от ее заданного значения  $K_0$  и принимают действия к уменьшению или полному исключению  $e(t)$ . Простейшим примером замкнутой системы, называемой *системой регулирования по отклонению*, служит показанная на рисунке 1.3, а система стабилизации уровня воды в баке. Система состоит из измерительного преобразователя (датчика) 2 уровня, устройства 1 управления (регулятора) и исполнительного механизма 3, управляющего положением регулирующего органа (клапана) 5.



**Рис. 1.3. Функциональные схемы автоматических СУ с управлением по отклонению (а), по возмущению (б) и комбинированные (в):**

1 – регулятор; 2 и 4 – измерительные преобразователи уровня и давления воды; 3 – исполнительный механизм; 5 – регулирующий орган

Признак замкнутой системы, действующей на отклонение регулируемой величины, – обратная связь с выхода ОУ на его вход. Замкнутые системы этого типа компенсируют любые возмущения, поскольку регулятор контролирует только отклонение регулируемой величины независимо от причины, его вызвавшей. Они не могут обеспечить равенство выходной величины  $Y(t)$  заданному значению  $Y_0$  в течение всего времени  $t$  управления, так как их принцип работы связан с наличием отклонения  $e = Y(t) - Y_0$ .

*Разомкнутые* автоматические СУ подразделяют на системы с жесткой программой и с управлением по возмущению. Пример систем первого типа – система автоматического пуска и остановки комплекса машин, входящих в технологическую линию, в которой должна выдерживаться определенная последовательность (программа) работы отдельных механизмов, при этом ОС с выхода объекта на его вход отсутствует.

В разомкнутых автоматических СУ, действующих по возмущению, управление осуществляется на основании информации о входных (возмущающих) воздействиях. В показанной на рисунке 1.3, б системе таким возмущением является изменение давления воды в подающем трубопроводе.

В реальных системах возможна компенсация одного или нескольких поддающихся измерению возмущений. Если таких возмущений несколько, то для компенсации каждого из них необходим свой контур регулирования. При этом всегда останется часть возмущений в том числе случайных и неконтролируемых, которые могут вызвать отклонение регулируемой величины  $Y(t)$  от заданной  $U_0$ .

Выход из этого – сочетание обоих принципов управления (по возмущению и отклонению). Такую систему называют *комбинированной* (рис. 1.3, в), и ее преимущество по сравнению с системой, действующей по отклонению, в лучшей стабилизации регулируемой величины.

*Стабилизирующие* системы поддерживают управляемую величину на заданном уровне, *программные* – изменяют управляемую величину по заданной программе и *следящие* – обеспечивают измерение управляемой величины в определенном соотношении к задающему воздействию. В защищенном грунте пример стабилизирующей СУ – система регулирования температуры грунта, программной СУ – система управления температурой в зависимости от времени суток, следящей СУ – то же, но в зависимости от уровня естественной освещенности.

По **методу управления** автоматические СУ подразделяют на приспособляющиеся (адаптивные) и неприспособляющиеся к изменяющимся условиям работы ОУ.

*Приспособляющиеся*, или *адаптивные*, автоматические СУ целенаправленно изменяют алгоритмы управления или параметры управляющих воздействий для достижения наилучшего управления объектом. Поскольку в процессе работы таких систем происходит изменение их алгоритмов и (или) структуры, то их называют также *самонастраивающимися*. Частный случай приспособляющихся систем – *экстремальные*, задача которых – автоматический поиск максимума или минимума управляемой величины.

Следующий признак классификации связан с **результатом работы системы в установившемся состоянии**. В соответствии с ним автоматические СУ делят на статические и астатические.

В *статических* системах по окончании переходного процесса существует разница между заданным и установившимся значениями

управляемой величины, которую называют *статической ошибкой*. Статическая ошибка  $\Delta Y_{ст}$  – неперенный признак таких систем, причем величина ее зависит как от величины возмущения, так и от параметров настройки регулятора.

В *астатических* системах управляемая величина по окончании переходного процесса равна заданному значению. Возможное отклонение (ошибка управления), свойственное реальным системам автоматики, обусловлено несовершенством ее элементов.

По **характеру изменения управляющих воздействий во времени** автоматические СУ делят на непрерывные и прерывистые, или дискретные.

В *непрерывных* системах управляемая величина и управляющее воздействие – непрерывные функции времени.

*Прерывистые* автоматические СУ подразделяют на релейные, импульсные и цифровые.

В *релейных* (позиционных) системах один из элементов, обычно это управляющее устройство (УУ), имеет существенно нелинейную (релейную) характеристику, в соответствии с которой управляющее воздействие изменяется скачкообразно при определенном значении управляемой величины. Такова, к примеру, система управления водонагревателем, в которой регулятор температуры включает электронагреватель при снижении температуры воды до определяемого настройкой регулятора значения.

*Импульсные* автоматические СУ имеют в своем составе звено, преобразующее управляемую величину в дискретную импульсную. При этом управляемой величине пропорциональна амплитуда или длительность импульсов.

В *цифровых* системах формирование управляющих воздействий осуществляется цифровыми вычислительными устройствами, которые оперируют не с непрерывными сигналами, а с дискретными числовыми последовательностями.

Следующий признак классификации – **число управляемых величин**. В соответствии с этим признаком автоматические СУ делят на одномерные и многомерные. *Одномерные* имеют по одной входной и выходной величине, а *многомерные* – по нескольким.

По **виду дифференциального уравнения** автоматические СУ подразделяют на линейные и нелинейные. К *линейным* относят системы, поведение которых описывается линейными дифференциальными урав-

нениями. Поскольку систем, абсолютно точно описываемых линейными дифференциальными уравнениями, практически не существует, сюда относят также линеаризованные системы, описываемые линейными дифференциальными уравнениями приближенно, при некоторых допущениях и ограничениях. *Нелинейными* являются системы, поведение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, причем в системе достаточно иметь всего один нелинейный элемент, чтобы вся она стала нелинейной.

### 1.3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В общем случае система управления сельскохозяйственным производством строится путем последовательного объединения систем управления отдельными ТП при условии обеспечения максимальной универсальности систем, надежности и рационального использования новейших методов построения автоматических систем и технических средств. Такая поэтапная автоматизация позволяет получить наибольший эффект от внедрения автоматических устройств при минимальных затратах, связанных с автоматизацией важнейших звеньев ТП.

Выполнение этой задачи требует расчленения общей задачи управления по иерархическому принципу, определяющему порядок взаимодействия отдельных частей управляющей системы.

На нижней ступени располагают *локальные системы автоматического управления* и взаимосвязанные типовые ТП, соответствующие простейшим технологическим операциям и типовому оборудованию. Технические решения по автоматизации таких ТП обычно являются типовыми. Задачи таких систем автоматического управления – обеспечение эффективности управления и надежности работы технологического оборудования.

В состав технических средств локальных систем автоматики входят:

- автоматические устройства с априорной или текущей информацией о возмущении, действующие по разомкнутой цепи преобразования сигнала в управляющее воздействие на ОУ;
- автоматические регуляторы, обеспечивающие стабилизацию заданного значения регулируемой величины путем выработки управляющего воздействия, соответствующего отклонению этой величины от заданного значения;
- средства автоматического контроля, которые выполняют функции измерения и регистрации контролируемых параметров процесса, а

также сигнализации о достижении этими параметрами установленных предельных значений;

- системы оптимизации, автоматически определяющие и поддерживающие оптимальный режим протекания ТП.

Задача построения локальных систем управления ТП – первоэтапная в решении проблемы автоматизации управления сельскохозяйственным производством в целом.

На более высокой ступени находятся системы управления такими сложными ТП, которые характеризуются большим объемом перерабатываемой информации и не могут управляться автоматическим устройством без участия человека. В этом случае функции управления распределяются между человеком-оператором и вычислительной машиной, способной переработать практически неограниченный объем информации. Эту ступень автоматизированного управления называют АСУ ТП, и классифицированные ранее локальные системы управления входят в ее состав.

Снижение стоимости и увеличение объемов выпуска микро-ЭВМ и микроконтроллеров изменило техническую базу автоматизации производства.

В общем виде *микропроцессорное устройство*, применяемое в системах управления, – это специализированное вычислительное устройство, приспособленное к работе в производственных условиях и включающее в себя, кроме собственно микропроцессора, также и средства для обмена сигналами с ОУ (измерительные контроллеры и интерфейсные блоки связи). При этом микропроцессор, выполненный на одной или нескольких больших интегральных схемах, предназначен для исполнения логических и арифметических операций по специальной программе, хранящейся в памяти устройства. *МикроЭВМ* – это комплектное устройство на базе микропроцессора, имеющее блоки памяти, ввода-вывода и сопряжения.

Структурная схема микропроцессорной системы управления на базе микроЭВМ показана на рисунке 1.4.

Алгоритмы управления реализованы в виде программ, хранящихся в памяти ЭВМ. Интерфейсные блоки служат для связи ЭВМ с ОУ (с исполнительными механизмами и регулирующими органами) и периферийным оборудованием (с пультом оператора, дисплеем). Пульт оператор использует для управления работой микроЭВМ, а дисплей – для представления ему информации о состоянии оборудования, контролируемых параметрах и других характеристиках автоматизированного процесса.

Сбор и преобразование в цифровую форму информации о ходе ТП, поступающей от разного рода измерительных преобразователей, осуществляются измерительными контроллерами. В состав интерфейсных

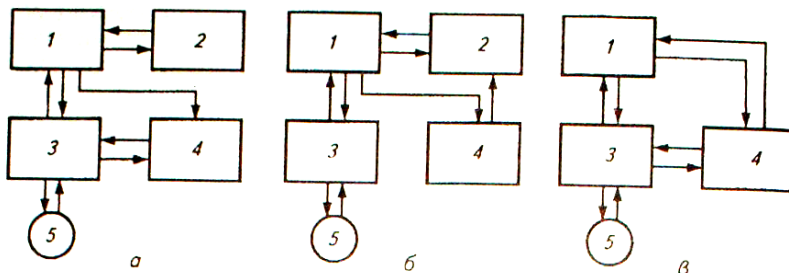


блоков связи и контроллеров тоже могут входить микропроцессоры, выполняющие те операции по вводу-выводу и предварительной обработке информации, которые обычно выполняет центральный процессор.

При построении систем управления сложными объектами, имеющими ступенчатую (иерархическую) структуру, микропроцессорную систему управления низкого уровня связывают с вышерасположенной также через интерфейсные блоки связи.



**Рис. 1.4. Структурная схема микропроцессорной системы управления с микро-ЭВМ:** 1 – технологический объект управления; 2 – измерительные преобразователи управляющих воздействий; 3 – измерительные преобразователи выходных параметров ОУ; 4 – измерительные контроллеры; 5 – управляющая ЭВМ; 6 – интерфейсные блоки связи с объектом; 7 – исполнительные механизмы; 8 – интерфейсные блоки связи с периферией; 9 – дисплей; 10 – пульт оператора



**Рис. 1.5. Режимы работы микроЭВМ в системах управления ТП:**  
 а – информационно-советующий; б – супервизорного управления;  
 в – непосредственного цифрового управления; 1 – технологический объект  
 управления; 2 – локальные автоматические системы; 3 – пункт контроля  
 и управления; 4 – управляющая микроЭВМ; 5 – оператор

Использование микроЭВМ в системах управления имеет ряд особенностей по сравнению с использованием ее в качестве универсальной ЭВМ, ориентированной прежде всего на взаимодействие с пользователем (человеком). Задача универсальных микроЭВМ – обработка данных по запросу пользователя, поэтому все устройства ввода-вывода информации (дисплеи, печатающие устройства, графопостроители, устройства внешней памяти и т.д.) подключаются к ЭВМ через свои блоки сопряжения по запросу пользователя.

В зависимости от достигнутого уровня совершенства технического и программного обеспечения управляющая микроЭВМ может работать в одном из трех режимов.

В *информационно-советующем режиме* (рис. 1.5, а) она выдает оператору рекомендации по управлению ТП, которые тот анализирует и либо принимает, либо отвергает, выдавая свое решение на основании текущей информации и предыдущего опыта.

Принятое решение реализуют вручную, через пульт контроля и управления. Основная тяжесть задачи управления (автоматические регулирование, защита и сигнализация) ложится на локальные автоматические системы.

В *режиме супервизорного управления* (рис. 1.5, б) контроль и коррекцию работы автоматической СУ выполняет микроЭВМ и оператор вмешивается в работу автоматических систем только в случае обнаружения тех или иных нарушений хода ТП.

В режиме прямого цифрового управления (рис. 1.5, в) микроЭВМ, обладающая высокой степенью надежности, непосредственно воздействует на ТП через исполнительные механизмы.

Многообразие требований, предъявляемых к техническим системам, порождает множество конструктивных решений элементов автоматических систем. При автоматизации конкретных производств стремятся ограничить номенклатуру используемых технических средств, которые выбирают прежде всего из числа стандартных и специализированных элементов, прошедших практическую проверку.

Многочисленность операций, выполняемых элементами автоматики (получение, усиление, преобразование входных сигналов, передача контрольной и исполнение командной информации, вычисление исходных сигналов по их дискретному представлению, распределение выходного сигнала по отдельным цепям его передачи и другие операции), требует ориентации на определенные типы функциональных блоков, объединяющих несколько элементов и удовлетворяющих комплексу общетехнических и специальных (технологических) требований.

Специальные (отраслевые) элементы и блоки автоматики предназначены для использования на конкретном оборудовании. Важное требование, предъявляемое к этим устройствам автоматики, – их универсальность, т. е. возможность применения в различных ТП и условиях эксплуатации.

Основой для применения одного и того же прибора или регулятора в различных автоматических системах с разными измерительными преобразователями (датчиками) служит идентичность параметров выходного электрического сигнала.

Существуют типовые измерительные преобразователи, позволяющие измерить и преобразовать в электрический сигнал практически любой технологический параметр. Это дает возможность обходиться ограниченным числом преобразователей, регулирующих устройств и исполнительного механизма (ИМ) для автоматизации систем управления различного назначения.

В результате автоматизации ТП непосредственное участие человека в системе управления не является необходимым, тем более что технические средства превосходят человека по физическим характеристикам, по надежности работы при выполнении повторяющихся операций, возможности хранить информацию и т. д. В этой связи возможны несколько вариантов оперативного управления ТП.

*Децентрализованный контроль и управление*, при котором оператор выполняет все функции по обслуживанию локальных систем автоматического управления последовательно одного объекта за другим.

Первичная информация, определяемая совокупностью значений переменных параметров процесса, образуется и представляется с помощью средств контрольно-измерительной техники.

*Централизованный контроль и управление*, при котором функции управления выполняет по-прежнему оператор, но теперь с рабочего места в центральном диспетчерском пункте, куда стекается информация о ходе ТП, прошедшая первичную обработку, селекцию, обобщение, сопоставление и т.д.

*Автоматизированное управление*, при котором функции управления в определенной степени осуществляет человек с применением развитых технических средств и ЭВМ.

*Автоматическое управление*, при котором роль оператора сводится только к наблюдению за работой системы, обслуживанию ЭВМ и изменению различных заданий по управлению ТП.

#### 1.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Экономическая *эффективность автоматизации* измеряется степенью уменьшения совокупного труда, затрачиваемого на производство единицы продукции. При автоматизации сельскохозяйственных производственных процессов стоимость капитальных затрат обычно несколько возрастает, а эксплуатационные расходы на единицу продукции существенно сокращаются. Таким образом, эффективность автоматизации характеризуется суммарным сокращением затрат на производство единицы продукции.

Если автоматизацию какого-либо процесса можно осуществить различными вариантами, то надо выбрать самый эффективный вариант, который обеспечивает более интенсивное снижение стоимости и более высокий рост производительности общественного труда. При этом очень важно за базовый вариант принять наиболее передовой и совершенный – вариант механизированного производства, применяемый или планируемый к внедрению в перспективе в отечественной или зарубежной практике. При сравнении с менее совершенным способом производства можно получить в расчетах завышенную экономию средств. Фактически этот же уровень может быть достигнут за счет более прогрессивной технологии машинного способа производства без привлечения автоматизации. По каждому выбранному варианту определяют затраты и экономический эффект. Лучшим признают вариант, у которого экономический эффект максимальный.

На технико-экономические показатели существенно влияют правильно сформулированные технические требования на автоматизацию ТП. Например, повышенные требования к точности работы автоматической системы приводят к усложнению устройств автоматики и существенному увеличению капитальных и эксплуатационных затрат.

Экономическая эффективность автоматизации складывается из энергетического, трудового, структурного и технологического эффектов.

Энергетический эффект определяют по сокращению расхода топлива или энергии, увеличению надежности и долговечности работы энергетического оборудования, экономичности работы систем энергообеспечения, повышению КПД силовых установок и т. д.

Трудовой эффект связан с сокращением прямых затрат живого труда обслуживающего персонала на выполнение ТП сельскохозяйственного производства. При переходе на автоматизацию затраты живого труда существенно сокращаются при незначительном увеличении капитальных затрат на аппаратуру автоматики.

Структурный эффект обусловлен сокращением регулирующих и запасных емкостей, уменьшением служебных помещений и инженерных коммуникаций, снижением металлоемкости и стоимости оборудования, увеличением съема продукции с единицы площади или объема производственных зданий, повышением концентрации построек на территории.

Технологический эффект обусловлен в основном увеличением производства сельскохозяйственной продукции за счет автоматизации ТП; например, в животноводстве, птицеводстве, защищенном грунте – это создание благоприятных климатических условий путем автоматического управления микроклиматом в зависимости от времени суток, сезона, возраста животных, вида растений, а также связанное с автоматизацией сокращение расхода корма и повышение качества продукции.

В результате технико-экономических, социально-экономических и качественных сравнений автоматизированного и неавтоматизированного способов производства определяют *основные показатели эффективности автоматизации*: капитальные затраты, эксплуатационные годовые издержки, рентабельность, срок окупаемости, приведенные затраты и др.

Капитальные затраты – одна из основных исходных величин при расчетах экономической эффективности автоматизации. Эти затраты складываются из стоимости средств  $K_c$ , автоматики с учетом их доставки, монтажа и наладки; затрат на модернизацию  $K_m$  действующей

техники и технологии, вызванную автоматизацией; стоимости строительства и реконструкции зданий  $K_3$ , в связи с внедрением автоматизации; остаточной стоимости  $K_0$  основных средств, подлежащих ликвидации при внедрении устройств автоматики, за вычетом стоимости  $K_p$ , полученной от реализации части ликвидируемых основных средств, т. е.

$$K = K_C + K_M + K_3 + K_0 - K_p.$$

При исчислении капитальных затрат на автоматизацию следует учитывать лишь те дополнительные затраты на здания, оборудование и перестройку технологии, которые вызваны только внедрением средств автоматизации.

Годовые эксплуатационные издержки производства складываются в основном из амортизационных отчислений  $I_0$ , отчислений  $I_m$  на текущий ремонт, затрат на зарплату  $I_3$ , обслуживающего персонала, стоимости электроэнергии  $I_э$ , стоимости топлива и смазочных материалов  $I_c$ , куда отнесены и некоторые другие годовые расходы,

$$I = I_0 + I_T + I_3 + I_э + I_c.$$

Прибыль годовых эксплуатационных издержек

$$\Pi = I_H - I_a + D.$$

При автоматизации сельскохозяйственного производства дополнительный доход  $D$ , не учтенный в ранее приведенных выражениях, часто имеет существенное значение. В ряде случаев, принимая во внимание этот доход, можно применять высоконадежные и дорогостоящие автоматизированные средства, получая при этом значительный экономический эффект.

Срок окупаемости капитальных затрат на автоматизацию при одинаковом годовом объеме производства

$$T = \frac{K_a - K_H}{I_H - I_a + D},$$

где  $K_a$  и  $K_H$  – капитальные затраты соответственно автоматизированного и неавтоматизированного производства ( $K_H < K_a$ );  $I_H$  и  $I_a$  – эксплуатационные годовые издержки соответственно неавтоматизированного и автоматизированного производства ( $I_H > I_a$ ).

Нормативный коэффициент экономической эффективности дополнительных капитальных затрат представляет собой величину, обратную нормативному сроку окупаемости  $T_H$ ,

$$E = 1/T_H$$

Производительность труда – важнейший показатель экономической эффективности. Она определяется количеством продукции, произведенной в единицу рабочего времени, или количеством рабочего времени, затраченного на производство единицы продукции. Повышение производительности труда, которое произошло в результате автоматизации, отражает уменьшение затрат труда, выраженное в процентах,

$$Z_T = (Z_H - Z_A) \cdot 100 / Z_H,$$

где  $Z_H$  – затраты на единицу продукции или вид работы при неавтоматизированном производстве;  $Z_A$  – то же, при автоматизированном производстве.

Экономия труда получается благодаря повышению его производительности

$$\Delta T = (Z_H - Z_A) A,$$

где  $A$  – годовой объем производства продукции после автоматизации.

Рентабельность производства связана с денежным измерением затрат труда и характеризует уровень доходности производства, т. е. относительное значение чистой прибыли

$$P = (Ц - C) 100 / C,$$

где  $Ц$  – оптовая цена продукции, р.;  $C$  – себестоимость продукции, р.

При автоматизации ТП следует вычислять показатель  $\Delta p$  дополнительной рентабельности, не связанной с оптовой ценой продукции:

$$\Delta p = (C_H - C_A) 100 / C_H,$$

где  $C_H$  – себестоимость продукции неавтоматизированного производства, р.;  $C_A$  – себестоимость продукции автоматизированного производства, р.

Приведенные расчетные затраты  $Z$  позволяют дать сравнительную оценку и выбрать (по минимальному значению) наиболее эффективный вариант автоматизации ТП. Их определяют по эксплуатационным издержкам  $I$  за год и первоначальным капитальным вложениям  $K$  на автоматизацию, приведенным к одинаковой размерности через нормативный коэффициент эффективности  $E_H$ :

$$Z = I + E_H K.$$

Нормативный коэффициент  $E_H$ , принимают не более 0,2 с учетом процентов кредитных ставок и рекомендуют для рыночных условий России равным 0,1.

Годовой экономический эффект от автоматизации при выпуске одной и той же продукции

$$\Delta = (Z_1 - Z_2)A,$$

где  $Z_1, Z_2$  – приведенные затраты на единицу продукции (работы) до и после автоматизации;  $A$  – годовой объем производства продукции (работы) после автоматизации.

В отдельных случаях необходимо учитывать социальные и экологические факторы, изменение которых вызвано использованием средств автоматизации. Поскольку количественно оценить социально-экологические факторы не всегда удастся, выбирают вариант автоматизации, который лучше удовлетворяет социальным стандартам и экологическим нормативам (например, улучшение условий труда, его престижности, снижение предельно допустимого уровня вредных веществ и воздействий и т. д.).

Примерную *последовательность расчетов экономической эффективности автоматизации* можно представить следующим образом:

- сбор и обобщение исходных данных,
- выбор базы сравнения,
- определение капитальных затрат, необходимых для приобретения и внедрения средств автоматики,
- подсчет годовых эксплуатационных издержек на содержание средств автоматики,
- исследование влияния автоматизации на технико-экономические и социально-экономические показатели производственного процесса,
- выявление ожидаемого экономического эффекта от внедрения автоматизации.

В общем виде основной критерий экономической эффективности применения средств автоматики в сельском хозяйстве определяется сокращением приведенных затрат  $Z$ .

Показатели экономической эффективности автоматизации необходимо рассчитывать для того, чтобы установить очередность автоматизации наиболее прогрессивных и экономически выгодных ТП в сельскохозяйственном производстве, выбрать наиболее экономичные методы и технические средства автоматизации, определить технико-экономические показатели ее эффективности, подсчитать годовой экономический эффект, имея в виду последующее материальное стимулирование работников.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Что называется автоматизацией технологических процессов?
2. Перечислите основные виды автоматизации. Поясните особенности каждого из них.
3. Что представляет собой автоматическая защита?



4. Что образует автоматическую систему управления? Опишите принцип действия АСУ.
5. По каким признакам классифицируют автоматические системы управления? Как они подразделяются внутри каждой группы? Охарактеризуйте дистанционное и телемеханическое управление.
6. Что называется кибернетикой?
7. Чем различаются частичная, комплексная и полная механизация?
8. Что входит в состав технических средств локальных систем автоматизации?
9. В каких режимах может работать управляющая микроЭВМ?
10. Представьте схему и принцип работы микропроцессорной системы управления.
  11. Какие возможны варианты оперативного управления ТП?
  12. Каковы основные источники и показатели технико-экономической эффективности автоматизации?
  13. Из чего складываются капитальные затраты и годовые эксплуатационные издержки производства?
  14. Что является важнейшим показателем экономической эффективности? Приведите формулы, отражающие его связь с автоматизацией производства.
  15. Какова последовательность расчетов экономической эффективности автоматизации?

## 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 2.1. ОПЕРАЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Современное сельскохозяйственное производство – это объединение в комплекс сложных биотехнических систем.

Рассмотрим условия функционирования такой системы на базе одной из отраслей сельскохозяйственного производства – животноводства. При всем разнообразии технологических процессов в животноводстве их можно свести к сравнительно небольшому числу видов единичных операций:

- биологические, т. е. происходящие в организме животного преобразования (приготовление корма, переработка навоза);
- тепловые;
- механические (перемещение материальных потоков, вращение рабочих органов).

Совокупность единичных операций образует конкретные технологические процессы, например приготовления и раздачи кормов, уборки и утилизации навоза, получения и переработки продукции и т. д.

В общем случае технологический процесс реализуется посредством технологических операций, которые выполняются параллельно, последовательно или комбинированно, когда начало последующей операции сдвинуто по отношению к началу предыдущей.

Технологические процессы сельскохозяйственного производства имеют существенные особенности.

1. *Поточность*. Потоки равны по закономерностям и структуре (материалы, энергия, биологические объекты и т. д.), но у них есть общее: возможность коммутировать, накапливать, менять интенсивность потока.

2. *Цикличность*. Технологический процесс имеет суточный или годовой цикл.

3. *Единство цели управления*. Технологический процесс есть единое целое, и нарушение в одном звене нарушает весь цикл. Потеря продукции в результате нарушения хода ТП, как правило, не может быть компенсирована.

4. *Разнообразие частей ТП*. Технологический процесс объединяет значительное число поточных линий (на животноводческом комплексе 6...10). Отсюда большой объем информации и сложность выработки оптимального алгоритма управления.

5. *Плохая подготовленность к автоматизации.* Вызвана тяжелыми условиями работы, значительной рассредоточенностью объектов, низкой квалификацией обслуживающего персонала. Эти особенности общие для широкого круга ТП, что делает возможной разработку систем управления, предназначенных для большого числа однотипных ТП.

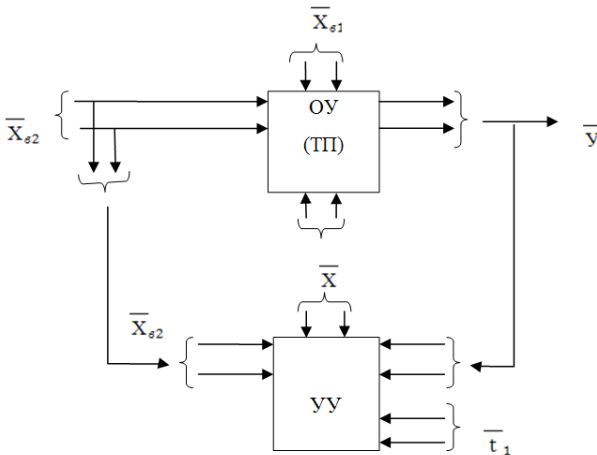
Решение по управлению ТП принимают с учетом распорядка дня, режимов работы, организационных особенностей ТП.

Технологический процесс характеризуют группой качественных и численных показателей, на которые влияют возмущающие, а также управляющие воздействия.

Возмущения, влияющие на ход технологического процесса, могут контролироваться, а могут иметь случайный и неконтролируемый характер (поломки оборудования, заболевания животных).

*Управляющие воздействия* регламентируются распорядком дня, режимом работы технологического оборудования, производственными инструкциями и т. д. Осуществляются управляющие воздействия автоматически или вручную. Управление технологическим процессом представляет собой организационно-техническую задачу, и решают ее сегодня, создавая автоматические или автоматизированные системы управления технологическим процессом, органичное звено которых – человек-оператор, чьи функции зависят от режима, в котором действует СУ.

Схема связей в СУ показана на рисунке 2.1. Воздействия на процесс можно классифицировать следующим образом.



**Рис. 2.1. Схема связей в автоматических СУ:**  
 ОУ – объект управления; УУ – управляющее устройство

*Управляемые воздействия* на рисунке 2.1 обозначены вектором  $U$ . В эту группу входят переменные параметры, которые необходимо поддерживать на заданном уровне или изменять по заданному закону. Качество стабилизации параметров определяется требованиями технологии автоматизированного процесса и возможностями системы управления. Как правило, переменные, входящие в вектор  $U$ , измеряют непосредственно, но иногда такая возможность отсутствует, и тогда соответствующий параметр может быть определен с помощью вычислительного устройства, использующего математическую модель процесса и результаты измерений входных возмущений.

*Возмущающие воздействия* на рисунке 2.1 обозначены вектором  $X_e$ . В эту группу входят переменные, изменения в которых характеризуются влиянием внешних условий, характеристик оборудования и т. д. Часть этих воздействий  $X_{e1}$  измерить нельзя, их называют неконтролируемыми, а часть  $X_{e2}$  – можно, их называют контролируемыми, и результаты контроля могут быть использованы для корректировки хода процесса.

*Регулирующие воздействия* на рисунке 2.1 обозначены вектором  $X$ . Переменные, входящие в эту группу, используют для воздействия на процесс с целью управления.

Воздействия на УУ разделяют следующим образом.

1. Регулируемые величины  $F$ , характеризующие состояние автоматизируемого процесса.
2. Возмущающие воздействия (контролируемые)  $X_{e2}$  характеризующие влияние внешних условий на ход процесса.
3. Воздействия  $f_1$  от различных факторов, действующие на объект управления через УУ.

## 2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В общем виде структура управления ТП показана на рисунке 2.2; если оператор – необходимая часть системы, то ее квалифицируют как автоматизированную, если нет – как автоматическую.

Оператор действует в соответствии с целью управления, и его функции, в общем случае, очень обширны. К примеру, в обязанности оператора-животновода входят:

- ✓ соблюдение распорядка дня содержания и режимов кормления животных;
- ✓ получение информации от зооветслужбы о коррекции условий содержания, кормления и т.д.;

- ✓ восприятие информации о поведении объекта управления (животных);
- ✓ оценка и анализ технологической ситуации и выработка соответствующих решений;
- ✓ установка задания системе управления, коррекция программ в соответствии с текущими условиями;
- ✓ анализ информационных потоков о ходе ТП;
- ✓ защита животных и оборудования в случае возникновения аварийной ситуации;
- ✓ оперативная связь с вышестоящими органами управления, учет полученной продукции и т. д.

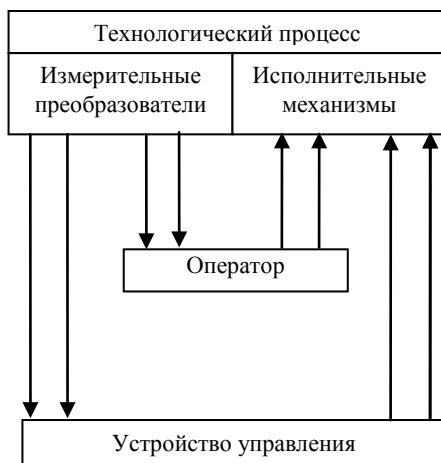
Все многообразие перечисленных задач, возникающих в ходе управления технологическим процессом, может быть классифицировано следующим образом.

*Логическое управление* применяют для управления поточно-транспортными линиями приготовления и раздачи корма, уборки навоза и т. д. в том случае, когда имеется необходимость обеспечения последовательности пуска, переключения и остановки механизмов, наличия блокировок, обеспечивающих нормальное функционирование ТП и защиту оборудования в аварийных ситуациях. Для логического управления важно знать состояние ТП в предшествующий момент времени.

*Программное управление* реализуется в разомкнутых системах автоматического управления. Управляемая величина изменяется по заранее заданной программе.

Например, норму жидкого корма, раздаваемого свиньям, устанавливают в зависимости от состояния животных и поедаемости корма и корректируют 1 раз в 10 суток. В отличие от принципа логического управления знание состояния ТП в предшествующий момент времени не обязательно.

*Управление по отклонению* используют в замкнутых автоматических СУ. Например, при регулировании уровня воды в баке водокачки неконтролируемые возмущения по нагрузке объекта (изменение расхода воды) или по каналу регулирующего воздействия (изменение подачи насоса) автоматически компенсируются в процессе стабилизации регулируемого параметра (уровня). Недостаток принципа управления по отклонению – низкие эксплуатационные характеристики в случае значительной инерционности объекта.



**Рис. 2.2.** Структурная схема управления ТП

*Управление по возмущению* используют в разомкнутых автоматических СУ. Управляющее воздействие принимает исходя из анализа действующих на систему возмущений. Например, решение о загрузке бункера принимают по анализу расходования кормов в связи с тем, что непрерывный контроль уровня сыпучих материалов затруднен. Недостаток управления по возмущению – накопление ошибки регулирования.

*Комбинированное управление* представляет собой комбинацию принципов управления по отклонению и возмущению. Например, система управления обогревом свинарника включает в себя замкнутую автоматическую СУ температурой электрообогреваемого пола и разомкнутую систему включения инфракрасного обогрева в зависимости от температуры воздуха.

Все пять рассмотренных принципов управления могут быть осуществлены в системах:

- ✓ местного управления (оператор следит за ходом ТП и управляет им, находясь рядом с технологической линией);
- ✓ дистанционного управления (оператор следит за ходом ТП по мнемосхеме, при этом улучшаются условия его работы, но контроль за ходом процесса ухудшается);
- ✓ централизованного управления (оператор следит за ходом ТП с центрального пульта, имеющего развитую систему контрольно-

измерительных приборов, а возможно и ЭВМ в режиме оператора-советчика).

### 2.3. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автоматизация сельского хозяйства опирается на богатый опыт промышленности. Вместе с тем к методам и средствам автоматизации, применяемым в животноводстве и растениеводстве, предъявляют специфические требования, обусловленные особенностями сельскохозяйственного производства.

В отличие от промышленности в сельском хозяйстве наряду с техникой используются почва и живые организмы, машинная технология тесно переплетается и увязывается с биологическими процессами.

Производственные процессы в сельском хозяйстве сложны и многообразны, имеют большой объем технологической информации и тесную взаимосвязь. Это обуславливает большое разнообразие ТП, исторически сложившихся в период использования живой тягловой силы и находящихся в стадии незавершенной перестройки на поточное машинное производство, а также большое число типов, конструкций, характеристик и режимов работы сельскохозяйственных машин и установок, многие из которых далеко не всегда приспособлены для применения на них даже простейших устройств автоматики.

Система машин, разработанная для сельского хозяйства, имеет около трех тысяч наименований по типам, почти 60 % из которых предназначены для полеводства и около 30% – для животноводства и птицеводства.

Немаловажные особенности – рассредоточенность сельскохозяйственной техники по большим площадям и удаленность ее от ремонтной базы, относительно малая мощность установок, тихоходность, невысокая квалификация обслуживающего персонала, а также сезонность их работы и непродолжительное использование в течение суток. Даже в животноводстве, где операции совершаются и повторяются ежедневно по определенному циклу, общее число часов работы машин в сутки относительно мало. Следовательно, *средства автоматики должны быть очень многообразными, относительно дешевыми, простыми по устройству и надежными в эксплуатации.*

Основная особенность сельскохозяйственного производства заключается в неразрывной связи техники с биологическими объектами (животными и растениями), для которых характерны непрерывность процессов образования продукции и цикличность ее получения, невоз-

возможность увеличения выпуска продукции за счет ускорения производства. В этих условиях автоматика должна работать надежно, так как такой процесс нельзя прервать и практически невозможно наверстать упущенное путем интенсификации последующего периода. Например, автоматика в животноводстве должна обеспечить цикличность выполнения технологических операций в течение суток независимо от погодных условий.

Возмущающие воздействия имеют высокую степень неоднородности и случайности с изменением своих величин. Многие объекты сельскохозяйственной автоматики имеют контролируемые и регулируемые параметры, распределенные как по технологическому полю или большому объему, так и во времени. Например, в нагревательных установках и сушилках, зернохранилищах и овощехранилищах, теплицах и животноводческих помещениях необходимо по всему объекту контролировать параметры (температуру, влажность, газосодержание, освещение и т. п.) и управлять ими. Для таких объектов системы автоматики должны иметь оптимальное число первичных преобразователей (датчиков) и исполнительных органов и в то же время обеспечить управление параметрами во всех рассредоточенных зонах с заданной точностью и надежностью.

Существенная особенность большинства сельскохозяйственных установок – их работа на открытом воздухе, где окружающая среда непостоянна: широкие пределы изменения влажности и температуры, наличие примесей, пыли, мякины, песка в полеводстве или агрессивных газов (аммиака, сероводорода и углекислого газа), бактериальной осемененности, плесени в животноводстве, а также наличие значительных вибраций и толчков.

Поэтому условия работы средств автоматики в сельском хозяйстве очень тяжелые и вероятность возникновения этих неисправностей значительно чаще, чем в других отраслях народного хозяйства.

Вследствие перечисленных особенностей и ряда других причин методы и *средства автоматизации и требования к ним в сельском хозяйстве значительно отличаются от промышленных.*

При разработке устройств автоматики сельских установок их необходимо рассчитывать на широкие пределы изменения параметров окружающей среды. Это позволит получить высоконадежные средства, так как наиболее эффективные мероприятия борьбы за повышение надежности устройств автоматики – выбор элементов с малой опасностью отказов и различные способы увеличения надежности при проектировании. Указанные специфические особенности в первую очередь влияют на первичные преобразователи (датчики) и исполнительные органы ав-



томатики, устанавливаемые непосредственно на объектах автоматизации и испытывающие все неблагоприятные условия окружающей среды. Остальные узлы автоматики можно располагать в отдельных помещениях или специальных шкафах, исключающих неблагоприятное воздействие окружающей среды.

#### 2.4. ТИПОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Общая задача управления ТП – это минимизация (максимизация) некоторого критерия (себестоимость, затраты энергии и т. д.) при выполнении ограничений на технологические параметры, накладываемых регламентом.

Поскольку решение этой задачи для всего процесса в целом затруднительно (много влияющих факторов), весь ТП следует разбить на отдельные участки, причем обычно участок соответствует законченной технологической операции, имеющей свою подзадачу (приготовление корма, обработка молока и т. д.).

Для отдельного ТП критерий оптимальности установить проще. Это может быть требование стабилизации параметра или несложно вычисляемого критерия. На основании принятого критерия оптимальности для отдельного ТП легко формулируется задача автоматизации. Кроме критерия оптимальности для решения этой задачи необходим анализ объекта автоматизации с точки зрения выявления всех существенных входных и выходных переменных, а также анализ статических и динамических характеристик каналов передачи возмущающих и управляющих воздействий.

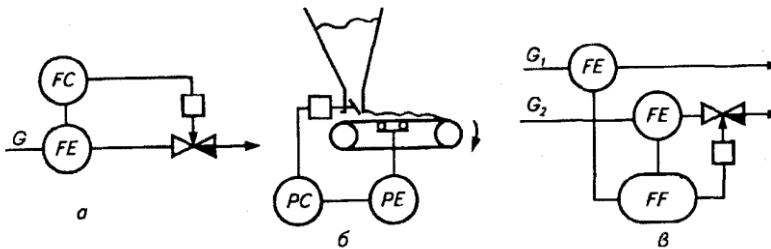
Технологические процессы одного типа (например, процессы нагрева) могут отличаться исполнением аппаратуры, физико-химическими свойствами участвующих в них потоков сырья и т.д. Однако все они протекают по одним и тем же законам и подчиняются общим закономерностям. Характер этих закономерностей в первую очередь определяется тем, какой параметр участвует в управлении. Для одного класса процессов, протекающих в типовой технологической системе, может быть разработано типовое решение по автоматизации, являющееся приемлемым для широкого круга систем. Наличие типового решения значительно упрощает задачу построения АСУ.

К числу типовых технологических параметров, подлежащих контролю и регулированию, относят расход, уровень, давление, температуру и ряд показателей качества.

**Регулирование расхода.** Системы регулирования расхода характеризуются малой инерционностью и частой пульсацией параметра.

Обычно управление расходом – это дросселирование потока вещества с помощью клапана или шибера; изменение напора в трубопроводе за счет изменения частоты вращения привода насоса или степени байпасирования (отведения части потока через дополнительные каналы).

Принципы реализации регуляторов расхода жидких и газообразных сред показаны на рисунке 2.3, а, сыпучих материалов – на рисунке 2.3, б.



**Рис. 2.3. Схемы регулирования расхода:**

а – жидких и газообразных сред; б – сыпучих материалов; в – соотношения сред

В практике автоматизации ТП встречаются случаи, когда требуется стабилизация соотношения расходов двух или более сред.

В схеме, показанной на рисунке 2.3, в, поток  $G_1$  – ведущий, а поток  $G_2 = \gamma G_1$  – ведомый, где  $\gamma$  – коэффициент соотношения расходов, который устанавливают в процессе статической настройки регулятора.

При изменении ведущего потока  $G_1$  регулятор  $FF$  пропорционально изменяет ведомый поток  $G_2$ .

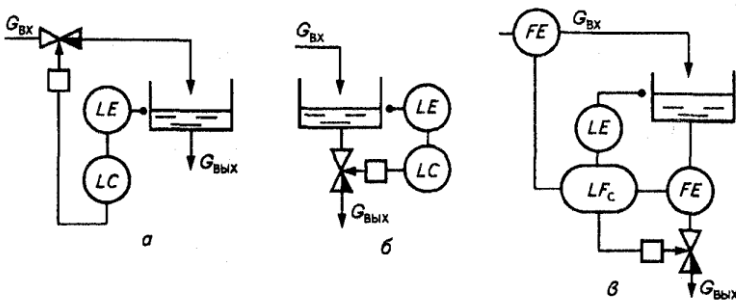
Выбор закона регулирования зависит от требуемого качества стабилизации параметра.

**Регулирование уровня.** Системы регулирования уровня имеют те же особенности, что и системы регулирования расхода. В общем случае поведение уровня описывается дифференциальным уравнением

$$S \frac{dL}{dt} = G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} \pm G_{\text{обр}}, \quad (2.1)$$

где  $S$  – площадь горизонтального сечения емкости;  $L$  – уровень;  $C_{\text{вх}}$ ,  $G_{\text{вых}}$  – расход среды на входе и выходе;  $C_{\text{обр}}$  – количество среды, увеличивающейся или уменьшающейся в емкости (может быть равно 0) в единицу времени  $t$ .

Постоянство уровня свидетельствует о равенстве количеств подаваемой и расходуемой жидкости. Это условие может быть обеспечено воздействием на подачу (рис. 2.4, а) или расход (рис. 2.4, б) жидкости. В варианте регулятора, показанном на рисунке 2.4, в, используют для стабилизации параметра результаты измерений подачи и расхода жидкости. Импульс по уровню жидкости – корректирующий, он исключает накопление ошибки вследствие неизбежных погрешностей, возникающих при изменении подачи и расхода. Выбор закона регулирования также зависит от требуемого качества стабилизации параметра. При этом возможно использование не только пропорциональных, но также и позиционных регуляторов.



**Рис. 2.4. Схемы систем регулирования уровня:**  
а - с воздействием на подачу, б и в – с воздействием на расход среды

**Регулирование давления.** Постоянство давления, как и постоянство уровня, свидетельствует о материальном балансе объекта.

В общем случае изменение давления описывается уравнением, аналогичным формуле (2.1),

$$M \frac{dp}{dt} = G_{вх} - G_{вых} \pm G_{обр}, \quad (2.2)$$

где  $V$  – объем аппарата;  $p$  – давление.

Аналогичность уравнений (2.1) и (2.2) свидетельствует о том, что способы регулирования давления аналогичны способам регулирования уровня.

**Регулирование температуры.** Температура – показатель термодинамического состояния системы. Динамические характеристики системы регулирования температуры зависят от физико-химических параметров процесса и конструкции аппарата. Особенность такой системы – значительная инерционность объекта и нередко измерительного преобразователя.

Принципы реализации регуляторов температуры аналогичны принципам реализации регуляторов уровня (рис. 2.4) с учетом управления расходом энергии в объекте.

Выбор закона регулирования зависит от инерционности объекта: чем она больше, тем закон регулирования сложнее. Постоянная времени измерительного преобразователя может быть снижена за счет увеличения скорости движения теплоносителя, уменьшения толщины стенок защитного чехла (гильзы) и т. д.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Охарактеризуйте особенности ТП сельскохозяйственного производства.
2. Назовите виды воздействий на объект управления. Каковы особенности каждого из них?
3. Приведите и поясните структурную схему управления ТП.
4. Каковы основные принципы управления ТП?
5. Каковы особенности автоматизации сельскохозяйственного производства?
6. Что является общей задачей управления ТП?
7. Что относится к типовым технологическим параметрам Ю подлежащим контролю и регулированию?
8. Назовите и поясните типовые технические решения при автоматизации ТП.
9. Приведите уравнения, описывающие подведение уровня и изменения давления. О чем свидетельствует их аналогичность?
10. Что следует учитывать при регулировании температуры?

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

#### 3.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Для создания автоматических СУ необходимо располагать математическим описанием процессов, происходящих как в самой системе, так и в ее элементах.

Под *математическим описанием (математической моделью)* подразумевается совокупность уравнений и граничных условий, описывающих зависимость выходных величин от входных в установившемся и переходном режимах. В связи с этим различают две группы математических моделей:

- установившегося режима (*модель статики*);
- переходного режима (*модель динамики*).

Вначале рассмотрим модели динамики. Они имеют вид уравнений, описывающих изменение во времени выходных величин систем (элементов) в зависимости от изменения входных. Такой режим (процесс) функционирования системы называют переходным и описывают дифференциальными или интегрально-дифференциальными уравнениями.

Частный случай переходного режима – установившийся, характеризуемый независимостью входных и выходных координат от времени. Этот режим описывается дифференциальными уравнениями нулевого порядка, т. е. алгебраическими уравнениями, получаемыми из уравнений динамики приравниванием к нулю всех производных по времени.

Таким образом, в общем случае математической моделью системы (элемента) с  $m$  входными  $\{x_1, x_2, \dots, x_m\} = \bar{X}$  и  $n$  выходными координатами  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} = \bar{Y}$  называют совокупность уравнений  $\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{a})$ , однозначно описывающих поведение  $\bar{Y}$  при данных векторах  $\bar{X}$  и  $\bar{a}$ , где  $\bar{a}$  – вектор, характеризующий конструктивно-технологические характеристики системы (элемента).

Кроме математических, существуют физические (электрические, гидравлические и др.) модели, но в любом случае подобие модели и оригинала основано на идентичности математического описания процессов в модели и оригинале.

Например, зависимости для расчета теплового потока  $q = \lambda \frac{dt}{dh}$ , силы трения  $\tau = \mu \frac{dv}{dh}$  и силы тока  $j = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dh}$ , характеризующие разные

по физической природе явления, описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Математическая модель может быть получена аналитическим или экспериментальными методами. В последнем случае она может быть *детерминированной*, когда выходная величина однозначно определяется входной, или *статистической*, когда входные воздействия – случайные величины.

### 3.2. МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ И ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМОВ

Напомним, что математическая модель *установившегося режима* (иначе – статическая характеристика элемента или системы) отражает функциональную связь между входными и выходными величинами в установившемся состоянии, а математическая модель *переходного режима* (динамическая характеристика элемента или системы) описывает изменение выходной величины во времени в зависимости от изменения входной величины.

Как уравнения статики, так и уравнения динамики могут быть линейными или нелинейными, в последнем случае они подлежат линеаризации.

**Линеаризация уравнений динамики.** Итак, в общем случае при наличии одной выходной ( $y$ ) и нескольких входных величин ( $x$ ) динамика элемента (системы) описывается дифференциальным уравнением (для двух  $x_1$  и  $x_2$ )

$$F(y^n, y^{n-1}, \dots, x_1^m, x_1^{m-1}, \dots, x_1^l, x_2^l, x_2^{l-1}, \dots, x_2) = 0, \quad (3.1)$$

где  $F$  – некоторая нелинейная функция;  $n, m, l$  – целые натуральные числа, определяющие наивысший порядок входящих в уравнение производных входной и выходной величин по времени.

Для реальных систем порядок дифференциального уравнения  $n > m$  и  $n > l$ . Линеаризацию нелинейных дифференциальных уравнений осуществляют методом малых отклонений. При этом вместо абсолютного значения переменных в уравнении (3.1) используют их отклонения от начального значения

$$\Delta y = y - y_0; \quad \Delta x_1 = x_1 - x_{10}.$$

В результате уравнение (3.1) становится линейным и при одной входной величине  $\Delta X$  может быть записано в виде

$$a_n \Delta y^n + a_{n-1} \Delta y^{n-1} + \dots + a_0 \Delta y = b_m \Delta x^m + b_{m-1} \Delta x^{m-1} + \dots + b_0 \Delta x,$$

где  $a_0 \dots a_n, b_0 \dots b_m$  – постоянные коэффициенты.

**Линеаризация уравнений статики.** Уравнения статики элементов (систем) автоматического управления, как правило, нелинейные и могут быть представлены в виде кривой или ломаной линии.

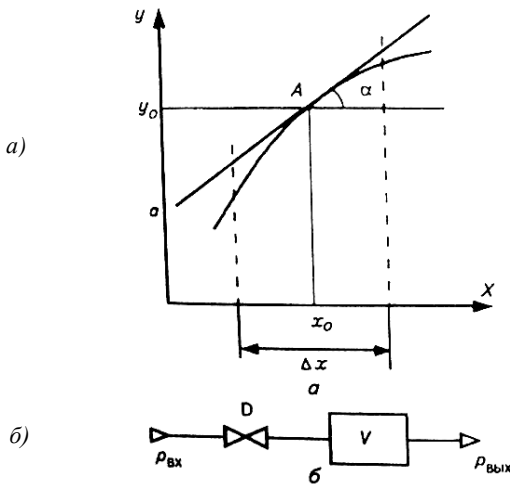
Линеаризация нелинейных статических характеристик осуществляется несколькими способами.

**Метод малых отклонений.** Основан на разложении аналитической функции  $y = f(x)$  в ряд Тейлора и отбрасывании малозначачих членов.

$$\Delta y = f_1(x_0) + f_1'(x_0)\Delta x_0 + \frac{1}{2}f_1''(x_0)\Delta x^2 + \dots$$

Таким образом, линеаризованное уравнение  $\Delta y = a + b\Delta x$ , где  $a = f_1(x_0)$ ;  $b = f_1'(x_0)$ .

Метод касательной (рис. 3.1, а). Основан на замене участка кривой прямой линией, касательной к этой кривой в точке  $A(x_0, y_0)$ , называемой рабочей точкой и находящейся в середине рабочего диапазона изменения  $\Delta x$ . Как и в предыдущем случае, линеаризованное уравнение имеет вид  $y = a + bx$ , где  $b = tg(\alpha)$ .



**Рис. 3.1. Линеаризация статической характеристики (а) и модель пневматической камеры (б)**

Метод секущей. Основан на замене уравнения нелинейной характеристики уравнением секущей, параметры которого определяют методом наименьших квадратов.

Первый из рассмотренных методов применяют, когда статическая характеристика задана аналитически, второй и третий – графически.

Встречаются элементы автоматической СУ, статические характеристики которых не поддаются линеаризации указанными ранее методами. Эти характеристики называют *существенно нелинейными*.

### 3.3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Дифференциальные уравнения простых элементов можно составить, используя закономерности протекающих в них физических явлений. Такими закономерностями могут быть: закон сохранения вещества (объект регулирования уровня, давления), закон сохранения энергии (объект регулирования температуры), законы электротехники и т.д. Уравнения статических и переходных режимов составляют на базе уравнений балансов вещества или энергии.

При составлении дифференциальных уравнений сложного объекта (или системы) он должен быть расчленен на простейшие элементы, соединенные последовательно, для каждого из которых составляют математические модели статики и динамики. Дифференциальное уравнение объекта или системы в целом получают путем исключения промежуточных величин.

Как указывалось выше, в большинстве случаев уравнения элементов нелинейные, и потому дифференциальное уравнение системы, как правило, нелинейное и подлежит линеаризации.

В целях упрощения задачи при использовании аналитического метода построения математической модели допускают определенные упрощения (пренебрегают распределенностью параметров, исключают несущественные возмущающие воздействия и т. д.).

ПРИМЕР. Проиллюстрируем применение данного метода на примере пневматической системы (рис. 3.1, б), состоящей из дросселя  $D$  и камеры объемом  $V$ . Входная величина системы – давление  $p_{\text{вх}}$  воздуха перед дросселем, выходная – давление  $p_{\text{вых}}$  за камерой. Расход воздуха через дроссель  $M = \alpha(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})$ , где  $\alpha$  – коэффициент расхода (проводимость) дросселя, кг/(с • Па). С другой стороны, согласно уравнению состояния идеального газа  $b = pV/RT$ , где  $R$  – универсальная газовая



постоянная;  $T$  – температура газа, К. Изменение массового расхода за время  $\Delta t$

$$\Delta M = \frac{V}{RT} \Delta p_{\text{вблх}} = \alpha (p_{\text{ex}} - p_{\text{вблх}}) \Delta t.$$

Разделив обе части уравнения на  $\alpha \Delta t$ , получим уравнение динамики элемента

$$\frac{V}{\alpha RT} \frac{dp_{\text{вблх}}}{dt} + p_{\text{вблх}} = p_{\text{ex}}.$$

В статическом режиме  $p_{\text{вблх}} = kp_{\text{ex}}$

Чтобы получить такое простое уравнение, был сделан ряд допущений: процесс дросселирования газа считали изотермическим и не учитывали зависимость  $\alpha$  от  $\Delta p$ .

### 3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В практике синтеза автоматических СУ технологическими процессами сельскохозяйственного производства используют два метода экспериментального определения (идентификации) статических и динамических характеристик объектов автоматизации – *активный* и *пассивный*.

В первом случае испытательное воздействие стандартной формы задают искусственно, во втором – объект исследуют путем сопоставления выходных и входных величин в условиях нормальной эксплуатации объекта.

Выбор метода идентификации объекта определяется поставленной задачей, условиями опытов, эксплуатационными возмущениями и допустимыми по технологическим требованиям отклонениями исследуемых величин. Логика выбора метода будет рассмотрена ниже.

**Определение статических характеристик (активный метод).** Уравнения статики описывают поведение объекта в установившемся состоянии, т. е. показывают взаимосвязи между входными  $x(t)$  и выходными  $y(t)$  координатами, когда все производные функций  $x(t)$  и  $y(t)$  равны нулю. В общем виде статическая характеристика объекта с  $m$  входами имеет вид

$$y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Рассмотрим процедуру определения статических характеристик объекта поэтапно.

1. Подготовка и планирование эксперимента. Изучают ТП, оборудование и устанавливают взаимные связи между выходными и входными параметрами.

2. Проведение эксперимента. Каждая входная величина изменяется ступенчато в пределах рабочего диапазона  $\Delta X$  и спустя (2...3)  $T_y$ , где  $T_y$  – длительность процесса фиксируют значение выходной величины  $y$ . Так, для определения статических характеристик зимней теплицы с водяным обогревом устанавливают соотношения между расходом воды через регулирующий клапан и температурой воздуха в средней точке теплицы. При этом температуру измеряют после стабилизации температурного режима сооружения. Общее число опытов

$$d = (x_{\max} - x_{\min}) / \Delta x,$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – верхняя и нижняя границы диапазона изменения входной величины;  $\Delta x$  – величина входного воздействия.

Практически рекомендуемое число опытов  $d = 6 \dots 10$ . Опыт повторяют по каждому из каналов исследования.

3. Обработка результатов эксперимента. Полученные зависимости  $y = f(x_1, x_2, \dots)$  могут быть искажены помехой и потому подлежат сглаживанию одним из известных методов (обычно скользящего среднего или четвертых разностей).

Идея метода четвертых разностей состоит в последовательном вычислении поправки для каждой экспериментальной точки  $i$  последовательно. Эту поправку вычисляют по формуле:

$$\delta y_i = y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_{i+1} - 4y_{i+1} + y_{i+2},$$

в которую входят ордината  $i$ -й точки и ординаты четырех соседних с ней точек  $i-2$ ,  $i-1$ ,  $i+1$ ,  $i+2$ .

Истинное значение

$$y_i^* = y_i + \delta y_i.$$

Полученная статическая характеристика, как правило, нелинейна, и потому желательна ее линеаризация одним из рассмотренных выше методов с целью аппроксимации простейшей зависимостью вида  $y = a + bx$ .

При двух входных воздействиях  $x_1$  и  $x_2$  вид аппроксимирующего выражения усложняется:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2.$$

### Определение статических характеристик (пассивный метод).

Стохастические (случайные) изменения выходных величин нормально функционирующего объекта автоматизации обусловлены как случайными изменениями входных величин, так и процессами, происходящими в самом объекте, причем последующие значения случайно изменяющихся физических величин точно предсказать невозможно.

В рассмотренном выше примере с теплицей такого рода случайно изменяющимися воздействиями являются изменения наружной температуры, солнечной радиации или давления воды в питающей тепловой сети. С математической точки зрения, такие воздействия и процессы, ими вызываемые, рассматривают как случайные функции (СФ) времени. Значение их статических характеристик позволяет определить динамические характеристики объекта автоматизации и успешно решить задачу синтеза САР. При этом обычно достаточно использования теории СФ, характеристиками случайного процесса (СП) которой служат математическое ожидание (МО) и корреляционная функция (КФ).

Математическое ожидание СП  $x(t)$  в момент времени  $t_i$  есть среднее арифметическое значение для  $N$  реализаций СП:

$$m_x(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_i)$$

где  $i$  – номер реализации.

Математическое ожидание СП – детерминированная величина. Случайный процесс  $x(t)$ , МО которого равно нулю, называют *центрированным*,  $m[x(t)] = 0$ .

*Дисперсия* характеризует интенсивность отклонения СП от МО. Ее определяют как среднее значение квадрата колебаний центрированного СП:

$$D_x(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{x_i(t_i) - m_x(t_i)\}^2$$

Дисперсия СП в момент  $t_i$  – детерминированная величина. Она всегда положительна.

Вместо дисперсии часто используют *среднее квадратическое отклонение* СФ

$$\sigma_x(t_i) = \sqrt{D_x(t_i)}.$$

Автокорреляционная функция характеризует связь между значениями СП в разные моменты времени  $t_i$  и  $t_j$

$$R_{xx}(t_i, t_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i(t_i) - m_x(t_i)] [x_j(t_j) - m_x(t_j)].$$

Случайные процессы могут быть *стационарные* и *нестационарные*. К группе нестационарных относятся СП, МО и КФ, которые зависят от времени, т. е. от точки отсчета.

Автокорреляционная функция  $R_{xx}(\tau)$  стационарного СП зависит только от интервала сдвига ( $\tau$ ) и не зависит от момента отсчета.

Многие СП обладают свойством *эргодичности*, которое состоит в том, что характеристики процессов, вычисленные по множеству реализаций при фиксированном времени и усреднением по времени одной реализации длиной  $T$ , совпадают.

Для СП, обладающих свойством эргодичности,

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt.$$

Если интервал реализации  $T$  разделить на  $N$  дискретных интервалов времени  $\Delta t$  (шаг дискретизации), то оценка центрированной КФ

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t) x(i\Delta t + j\Delta t).$$

*Спектральная плотность* характеризует частотные свойства СП (среднее значение квадрата амплитуды гармоник)

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = 2 \int_0^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau.$$

Первое из выражений для вычисления спектральной плотности связано с предварительной аппроксимацией КФ каким-либо аналитическим выражением с последующим использованием табличных интегралов. При использовании ЭВМ предпочтительно вычисление  $S_{xx}(\omega)$  и  $R_{xx}(\tau)$  методами численного эксперимента.

Кроме расчетных методов, для получения спектральных плотностей может быть использован специальный частотный анализатор.

Спектральная плотность – четная функция частоты, причем медленно меняющиеся (низкочастотные) процессы имеют более узкий график спектральной плотности, чем быстро меняющиеся (высокочастотные) процессы.

**Определение динамических характеристик.** Динамические характеристики объекта автоматизации могут быть представлены в виде *амплитудной фазочастотной характеристики (АФЧХ)*, определяемой по формуле:

$$W_{об}(j\omega) = S_{yx}(\omega)/S_{xx}(\omega),$$

где  $S_{xx}(\omega)$  и  $S_{yy}(\omega)$  – спектральная плотность входного сигнала и взаимная спектральная плотность входного и выходного сигналов.

Если входной сигнал объекта – «белый шум», то расчетная формула упрощается, ибо его спектральная плотность  $S_{xx}(\omega)$  – величина постоянная и равна  $a$ .

$$W_{об}(j\omega) = S_{yx}(\omega)/a.$$

По этим формулам строят АФЧХ объекта при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$ .

Подводя итоги, можно предложить следующие **рекомендации по выбору метода построения модели объекта**.

1. *Аналитический метод* дает модель, применимую для всего класса однотипных объектов, позволяющую оценить влияние конструктивно-технологических параметров объекта на его статические и динамические характеристики.

Недостаток метода – невысокая точность, поскольку его использование требует существенных упрощений задачи.

2. *Экспериментальный метод* дает модель, отличающуюся большой точностью и значительно меньшими трудозатратами.

Недостатки метода – невозможность применить модель для другого объекта и оценить влияние отдельных конструктивно-технологических параметров на характеристики объекта.

Пассивный эксперимент применим при высоком уровне возмущающих воздействий и в случае невозможности организовать требуемое детерминированное воздействие. В остальных случаях активный эксперимент предпочтительнее.

3. Перспективен *экспериментально-аналитический метод*. В этом случае уравнения статики и динамики составляются аналитическими методами, а коэффициенты этих уравнений находят экспериментально на реально существующих объектах.

Критерий адекватности модели и объекта – близость результата численного решения дифференциального уравнения и экспериментальной переходной характеристики.

### ***Контрольные задания***

1. В чем заключается необходимость применения математического моделирования при проектировании систем автоматики?
2. Что представляют собой математические модели? Их виды.
3. Чем различают математические модели установившегося и переходного режимов? Что у них общего?
4. Объясните принцип линеаризации уравнений статики и динамики элементов (систем) автоматического управления.
5. Какими способами осуществляется линеаризация нелинейных статических характеристик?
6. Охарактеризуйте аналитический метод построения математической модели.
7. Охарактеризуйте экспериментальные методы построения математической модели.
8. Как осуществляется описание статических характеристик активным и пассивным методами?
9. Поясните значения понятия эргодичность и спектральная плотность.
10. Объясните принцип определения динамических характеристик объекта управления.
11. Покажите необходимость и порядок определения передаточной функции объекта управления.

## 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ

### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИБОРАХ И СРЕДСТВАХ АВТОМАТИКИ

В целях унификации технических систем контроля и регулирования ТП различных отраслей народного хозяйства создана Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

Функциональная схема ГСП включает несколько групп приборов и устройств:

- для получения информации о состоянии ТП;
- приема, преобразования и передачи информации по каналам связи;
- преобразования, хранения и обработки информации и формирования команд управления;
- использования командной информации в целях воздействия на ОУ.

Функциональная структура ГСП состоит из нескольких ветвей. Функционально-целевая структура электрической ветви ГСП, получившая наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве, показана на рисунке 4.1. Такую ветвь делят на пять уровней (групп) технических средств:

I – технические средства непосредственного взаимодействия с объектом автоматизации, преобразующие параметры в унифицированный электрический сигнал (средства контроля и сигнализации) или унифицированный сигнал в управляющее воздействие на процесс (исполнительные органы);

II – вторичные приборы и регуляторы со встроенным датчиком для простых локальных систем автоматизации;

III – средства централизованного контроля, регулирования и управления для сложных систем автоматизации (АСУ ТП), отличающиеся наличием цифровой обработки информации;

IV – средства контроля, регулирования и управления для централизованных АСУ ТП на базе управляющей вычислительной техники, телемеханики;

V – средства вычислительной техники для решения задач автоматизации процессов организационно-экономического управления производством и предприятиями.

В сельскохозяйственной автоматике мобильных машин и агрегатов используют также технические средства гидравлической ветви ГСП, включающей устройства двух нижних уровней (рис. 4.1, правая часть):

I – средства преобразования для получения информации и воздействия на процесс;

II – средства контроля и регулирования для простых локальных систем автоматизации.

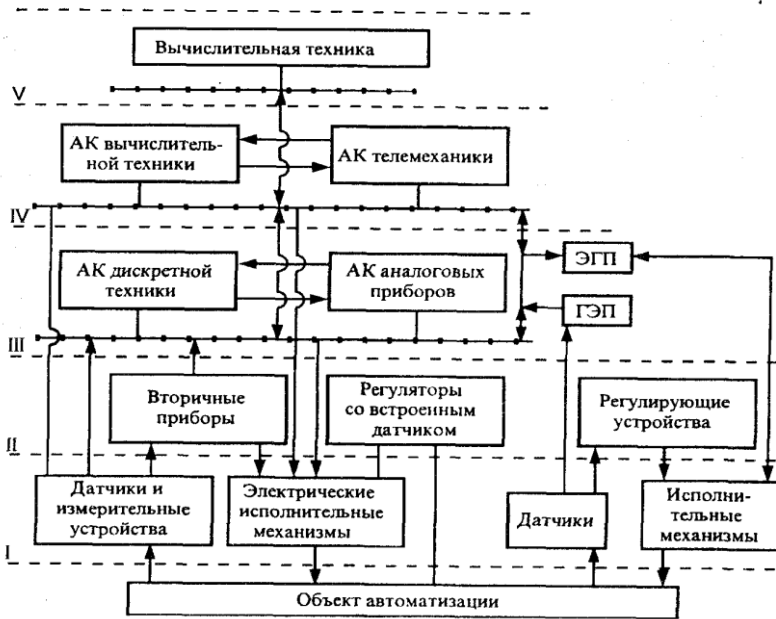


Рис. 4.1. Функционально-целевая структура электрической ветви ГСП:  
АК – агрегатный комплекс

Между техническими средствами электрической и гидравлической ветвей нередко существуют связи с взаимным обменом унифицированными сигналами благодаря применению электрогидравлических (ЭГП) и гидроэлектрических преобразователей (ГЭП). Это дает возможность выбрать оптимальную структуру технических средств из устройств разных ветвей ГСП.

Самый простой вариант структуры гидравлической ветви – группа приборов, работающих без вспомогательной энергии, состоящая из регуляторов прямого действия.



Входные и выходные сигналы приборов, входящие в ГСП, унифицированы:

- сигнал постоянного тока 0...5; 5...0...5; 0...20 мА;
- сигнал напряжения постоянного тока 0...1; 1...0...1; 0...10; 10...0...10 В;
- сигнал напряжения переменного тока частотой 50 и 400 Гц 0...0, 25; 0...0,5; 0...1; 0...2 В;
- пневматический сигнал с пределами изменения давления 0,02...0,1 МПа.

Кроме приборов, входящих в ГСП, в сельскохозяйственной автоматике действует большое число технических средств, оперирующих неунифицированными сигналами измерительной информации. Эти технические средства вписываются только в I и II уровни функционально-целевой структуры.

В этой главе дана характеристика группы технических средств, являющихся основой самых различных автоматических систем сельскохозяйственного назначения. Особое внимание уделяется здесь не конструктивным и метрологическим характеристикам оборудования, изучаемым в специальных курсах, а статическим и динамическим характеристикам, используемым при синтезе автоматических СУ. Результаты зависят также от выбора измерительного устройства, исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО).

#### 4.2. ОПИСАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Технические средства автоматизации (ТСА) – это устройства и приборы, которые могут как сами являться средствами автоматизации, так и входить в состав программно-аппаратного комплекса. Системы обеспечения безопасности на современном предприятии включают в свой состав технические средства автоматизации. Наиболее часто ТСА – это базовый элемент системы комплексной безопасности.

**Технические средства автоматизации** включают в себя приборы для фиксирования, переработки и передачи информации на автоматизированном производстве. С помощью их осуществляются контроль, регулирование и управление автоматизированными линиями производства.

**Системы обеспечения безопасности** осуществляют контроль над производственным процессом с помощью разнообразных датчиков. В них входят датчики давления, фотодатчики, датчики емкостные, лазерные и т.д.

Датчики служат для автоматического извлечения информации, и первичного ее преобразования. Датчики различаются по принципам действия и по чувствительности к параметрам, которые они контролируют. Технические средства безопасности включают в себя самый широкий спектр сенсоров. Именно комплексное использование датчиков позволяет создавать системы комплексной безопасности, которые контролируют множество факторов.

**Технические средства информации** включают в себя и передающие устройства, которые обеспечивают связь датчиков с контрольным оборудованием. При получении сигнала от датчиков контрольное оборудование приостанавливает процесс производства и ликвидирует причину аварии. В случае невозможности устранения аварийной ситуации технические средства безопасности дают сигнал о неисправности оператора. Измерительное устройство регулятора, как и всякое звено контура регулирования, характеризуется зависимостью между входной и выходной величинами в установившемся и переходном режимах. В установившемся режиме эта зависимость определяет статическую характеристику устройства. Желательно, чтобы статическая характеристика измерительного устройства в рабочем диапазоне изменения регулируемой величины была линейной.

**Технические средства безопасности** предназначаются для контроля потенциально опасных факторов производства на предприятии, автоматизированной ликвидации угрозы, и предупреждении об угрозе обслуживающего персонала. Технические средства безопасности также фиксируют момент возникновения аварийной ситуации для дальнейшего анализа ее причин.

Технические средства безопасности включают в себя:

- датчики (сенсоры);
- передающие устройства;
- центры обработки информации.

Технические средства безопасности – это базис любой современной системы обеспечения безопасности. Чем больше факторов контролируется техническими средствами, тем меньше риск возникновения аварийных ситуаций. Поэтому комплексные системы безопасности включают в себя самые разнообразные сенсоры (датчики), реагирующие на изменение пространственного положения объекта, его структуры, размеров температуры и так далее.

Датчики – это «глаза и уши» системы обеспечения безопасности. От их точности и способности оперативно реагировать на изменение ситуации зависит быстрдействие всей системы. Датчики собирают и кодируют первичную информацию о состоянии объекта, которая потом

поступает в центр обработки. Самые простые датчики показывают только наличие или отсутствие объекта. Более сложные сенсоры могут определять тип объекта, отслеживать его изменения.

Одними из часто используемых в устройстве систем безопасности являются *оптические датчики*. Они могут отслеживать угол наклона объектов, определять расстояние до предметов, а также классифицировать их.

Часто для классификации товаров применяются щелевые оптические датчики, которые считывают информацию с этикеток, наклеенных на упаковку товара. Оптические датчики на светодиодах или лазерах могут определять расстояния до объектов и тем самым предотвращать столкновения.

Оптические датчики используются и в системах машинного зрения, которые контролируют процесс производства с помощью видеокамер.

Оптические датчики различаются по сложности и размерам, а также по типам работы. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, оптические датчики с рассеянным отражением могут измерять расстояния в широких пределах. К их недостаткам относят проблемы с измерением расстояний до окрашенных или отражающих объектов, поскольку такие датчики работают с отраженным светом.

**В комплексные системы безопасности** включены датчики, отслеживающие самые разнообразные параметры контролируемых объектов. Среди таких сенсоров есть индуктивные датчики и релейная защита и автоматика.

*Релейная защита и автоматика* – это совокупность электрических аппаратов, осуществляющих автоматический контроль за работоспособностью электроэнергетических систем. Релейная защита и автоматика постоянно контролирует состояние электроэнергетической системы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов.

Релейная защита и автоматика может гибко реагировать на различные внештатные ситуации. Она либо отключает поврежденный участок от энергоснабжения, либо переводит оборудование на резервный источник питания, либо (в случаях серьезных неисправностей) сигнализирует обслуживающему персоналу.

Комплексные системы безопасности обеспечивают стабильную работу предприятий, автоматизированных складов и других объектов. Промышленная безопасность обеспечивается за счет контроля потенциально опасных факторов, таких, например, как уровень напряжения в сети, и своевременного устранения неполадок.

**Интегрированные системы безопасности** представляют собой единую систему контроля за процессом производства и отгрузки продукции. Они позволяют избежать травм обслуживающего персонала и поломок промышленного оборудования. Комплексные системы безопасности включают в себя множество датчиков, которые отслеживают все этапы производственного процесса.

Промышленная безопасность может быть обеспечена с помощью *датчиков движения, давления, измерения расстояния до объектов* и многими другими типам сенсоров.

В интегрированные системы безопасности входят ручные сканеры штрих-кода и фотодатчики.

*Ручные сканеры штрих-кода* представляют собой устройства, для считывания информации об изделии, нанесенной с помощью штрих-кодов на его поверхность, и передачи ее в компьютер. Ручные сканеры штрих-кодов позволяют быстро идентифицировать товар. Часто такие сканеры используются в торговле и системе автоматизированных складов.

Ручные сканеры штрих-кода отличаются по технологии считывания. Они могут быть одноплоскостные. В этом случае расположение этикетки на товаре и плоскости сканирования должны совпадать. Многополосные ручные сканеры менее чувствительны к расположению штрих-кода в пространстве.

Ручные сканеры могут отличаться размерами, разъемами для подключения к другим устройствам, а также источниками света. Самые простые ручные сканеры используют в качестве источника излучения светодиоды. В конструкции более совершенных ручных сканеров применяются маломощные лазеры.

*Фотодатчики* также отличаются многообразием конструкторских решений. Принцип их действия таков: светочувствительная пластина фотодатчика реагирует на изменение интенсивности излучения. Выход за установленные рамки колебаний светового излучения приводит к срабатыванию датчика.

Фотодатчики снабжены приемником и передатчиком света. Они могут находиться в разных корпусах или быть помещены в один корпус. Самые простые фотодатчики устроены следующим образом: светочувствительная пластина и источник света помещены в разные корпуса и находятся друг напротив друга. Как только объект попадает в зону контроля (пересекает луч), датчик срабатывает. Такие датчики могут быть использованы как для подсчета количества продукции, так и для остановки механизмов при попадании в них посторонних объектов.

Комплексные системы безопасности обеспечивают стабильную работу предприятий, автоматизированных складов и других объектов. Промышленная безопасность обеспечивается за счет контроля потенциально опасных факторов, таких, например, как уровень напряжения в сети, и своевременного устранения неполадок.

Интегрированные системы безопасности представляют собой единую систему контроля за процессом производства и отгрузки продукции. Они позволяют избежать травм обслуживающего персонала и поломок промышленного оборудования. Комплексные системы безопасности включают в себя множество датчиков, которые отслеживают все этапы производственного процесса.

Автоматизация производства позволяет улучшить качество и увеличить выпуск продукции. С помощью автоматизации линий можно сократить время на обработку, сборку и сортировку изделия, а также сократить персонал предприятия. Однако автоматизированные линии требуют постоянного контроля, поскольку для их создания используется высокотехнологичное оборудование.

Промышленная безопасность автоматизированных линий обеспечивается за счет внедрения датчиков контроля, к коим можно отнести и оптические датчики. Автоматика систем безопасности, основанной на различных датчиках, производит контроль производственного процесса и состояния оборудования, в случае необходимости внося коррективы в работу или останавливая производство.

Автоматизация выпуска продукции с помощью системы датчиков предназначена:

- для контроля наличия и положения изделия;
- подсчета количества продукции;
- контроля акцизных марок и этикеток.

Одним из распространенных видов сенсоров является *оптические датчики*. Они применяются в промышленном оборудовании и предназначены для контроля положения и расстояния, определения контрастных и цветовых меток и этикеток.

Современная автоматика включает в себя оптические датчики различного назначения.

Оптический датчик фотометок (щелевой) – это барьерные датчики оригинальной конструкции. Такие оптические датчики предназначены для работы с предметами типа упаковочной ленты, наклейками на ленточной основе и т.п. Наиболее часто встречается в упаковочных машинах. Просвет между перекладинами вилки щелевого оптического датчика может быть от 2 до 225 мм.

Оптические датчики фотометок предназначены для определения наличия/отсутствия на упаковке наклеек, акцизных марок, или других меток. Широко используется для контроля за выпускаемой продукцией.

Оптический барьерный датчик используется для обнаружения объектов, которые попадают в зону действия датчика, которая находится между передатчиком и приемником. Принцип работы оптического датчика такого типа довольно прост и эффективен. Приемник и излучатель оптического датчика размещаются в разных корпусах, которые монтируются напротив друг друга. Излучатель посылает световой луч в сторону приемника. При нарушении луча объектом датчик срабатывает.

Оптические волоконные датчики предназначены для измерения физических величин. Оптические датчики такой конструкции используются в качестве чувствительного элемента волоконный световод. С их помощью можно измерять деформацию, давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, ускорение, уровень жидкостей и множество других параметров.

**Системы идентификации объектов** широко применяются в современной автоматизированной промышленности. Поточное производство затрудняет контроль качества выпускаемой продукции непосредственно оператором, который в своей работе теперь опирается на показания датчиков.

Разнообразие сенсоров позволяет учитывать положение объекта в пространстве, скорость его вращения, структуру и тип объекта. Системы идентификации объектов чаще всего основаны на магнитных датчиках. *Магнитные датчики* имеют довольно широкую зону контроля и хорошо идентифицируют изделия из металла. Однако определить тип объекта они не могут, поскольку имеют всего два функциональных режима (есть объект / нет объекта).

Идентификация грузов, если они отличаются разнообразием, строится на визуальном контроле, который осуществляют системы машинного зрения. На таких системах основана практически любая автоматизация складов. Системы машинного зрения реагируют на форму объекта, цветовые метки на нем, что позволяет сортировать продукцию с высокой точностью и быстротой.

Идентификация грузов за счет визуального контроля значительно упрощает процедуру их сортировки. Системы машинного зрения считывают информацию с объектов, анализируют ее и направляют в компьютер, на базе которого строится автоматизация складов.

Если рассматривать принципы работы таких систем, то следует обратить внимание на то, что магнитные датчики работают по принципу «да/нет». Когда объект входит в зону контроля магнитного датчика, напряжение поля растет и, по достижении определенного порога, вызывает срабатывание датчика. Дальнейший рост напряженности магнитного поля не влияет на работу датчика. Когда контролируемый объект выходит из зоны контроля, напряжение магнитного поля ослабевает и достигает определенной точки, в которой датчик возвращается в первоначальное состояние.

Магнитные датчики хорошо подходят для контроля количества однородных объектов, для бесколлекторных двигателей, контроля положения объектов и т.д.

Системы машинного зрения действуют на основе визуальных сигналов. Со «скоростных» видеокамер визуальный сигнал поступает на обрабатывающие процессоры, в которых происходит его обработка. В дальнейшем информация поступает на компьютер или в сеть. Системы машинного зрения дают возможность контролировать несколько объектов одновременно, что позволяет существенно ускорить работу по учету и сортировке продукции.

Автоматизация складов может быть основана на разных типах контролируемых систем. Выбор системы идентификации объектов зависит от характера деятельности склада.

Измерительное устройство по сравнению с объектом управления (ОУ) должно иметь минимальные запаздывание и постоянную времени. Мощность, развиваемая измерительным устройством, должна быть больше мощности, необходимой для перемещения РО регулятором прямого действия или достаточной для нормальной работы регулятора непрямого действия.

*Тип измерительного устройства автоматического регулятора определяется:*

- видом регулируемого параметра (давление, температура, скорость и т. п.);
- физической природой преобразуемого сигнала (температура среды в электрический импульс, в механическое воздействие и т. д.);
- требуемой точностью поддержания регулируемого параметра;
- зависимостью показаний от условий измерения (запыленность среды, вибрация и т. п.).

Ниже рассмотрим принцип действия, особенность конструкции, а также характеристики устройств для измерения давления и разрежения,

температуры, уровня, расхода, перемещения и частоты вращения, применяемых в практике автоматизации ТП сельскохозяйственного производства.

**Измерение давления и разрежения.** Его проводят в основном с помощью механических устройств (пружины, мембраны, сильфоны), деформируемых или перемещаемых на величину, пропорциональную величине измеряемого параметра (табл. 4.1). Статическая характеристика устройств этого типа

$$S = \frac{F_p}{K},$$

где  $F$  – эквивалентная площадь упругого элемента,  $\text{м}^2$ ;  $p$  – контролируемое давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $K$  – жесткость упругого элемента,  $\text{м}/\text{Н}$ .

Динамические характеристики механических измерителей давления описываются передаточной функцией (ПФ) инерционного или, если масса подвижных частей значительна, колебательного звена. Постоянная времени инерционного звена  $T = \eta/K$ , где  $K$  – коэффициент трения среды, давление которой измеряют в  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

Для измерения разности давлений используют дифференциальные манометры, выходная величина  $S$  которых пропорциональна разности контролируемых давлений  $p_1 - p_2$ . Механические измерители применяют для контроля давления от  $10^{-2}$  до  $100 \text{ МН}$ . Для очень малых давлений удобны колокольные манометры. В динамическом отношении они также эквивалентны механическим. Коэффициент преобразования измерителя

$$K = 0,1 \frac{F_C}{F_K \rho},$$

где  $F_C$  и  $F_K$  – площади сосуда и стенок колокола,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .



В таблице 4.1 приведены схематическое изображение, выходные параметры и тип звена различных измерительных преобразователей.

Таблица 4.1

**Виды измерительных преобразователей**

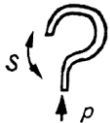
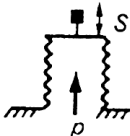
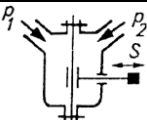
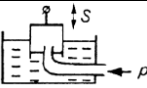
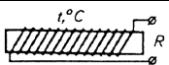
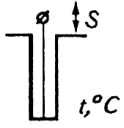
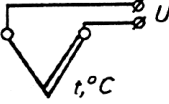
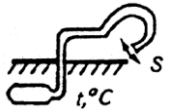
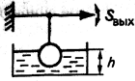

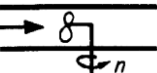
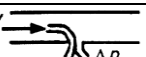
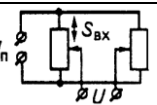

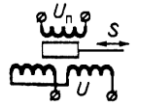
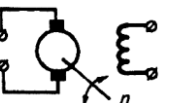

Схема	Наименование	Выходной параметр	Тип звена
<i>Измерение уровня</i>			
	Манометрическая пружина	Перемещение конца трубки $S$	Инерционное или колебательное
	Гармониковая мембрана (сильфон)	Перемещение сильфона $S$	Инерционное или колебательное
	Дифференциальный манометр	Перемещение мембраны $S$	Инерционное или колебательное
	Колокольный манометр	Перемещение поплавка $S$	Инерционное или колебательное
<i>Измерение температуры <math>t</math></i>			
	Металлический терморезистор	Электрическое сопротивление $R$	Инерционное (безынерционное)
	Дилатометр	Перемещение стержня $S$	Инерционное (безынерционное)
	Термопара	Напряжение $U$	Инерционное (безынерционное)
	Манометрический термометр	Перемещение $S$	Инерционное (безынерционное)

Схема	Наименование	Выходной параметр	Тип звена
	Поплавок	Перемещение $S_{вых}$	Безынерционное (колебательное)
<i>Измерение расхода <math>G</math></i>			
	Дроссельный расходомер	Перепад давления $\Delta p$	Безынерционное
	Счетчик	Частота вращения $n$	Безынерционное
	Пневмометрическая трубка	Перепад давления $\Delta p$	Безынерционное
<i>Измерение перемещения <math>S</math>, <math>\alpha</math></i>			
	Мост постоянного и переменного тока	Напряжение $U$	Безынерционное
	Сельсинтрансформатор	Напряжение $U$	Безынерционное
	Дифференциально-трансформаторный преобразователь	Напряжение $U$	Безынерционное
<i>Измерение частоты вращения <math>n</math></i>			
	Механический тахометр	Перемещение $S$	Колебательное
	Электрический тахометр	Напряжение $U$	Безынерционное
	Частотный тахометр	Напряжение $U$	Безынерционное

Кроме механических, применяют электрические измерители давления, использующие тензодатчики, пьезорезисторы, магнитоупругие элементы и т. д. В динамическом отношении эти измерители соответствуют безынерционным звеньям, коэффициент преобразования усиления которых определяется конструктивными особенностями измерителя.

**Измерение температуры.** Его проводят на основе зависимости некоторых физических параметров измерителя от температуры (табл. 4.1). Работа этой группы преобразователей основана на тепловом расширении твердых тел, жидкостей или газов (биметаллические, дилатометрические, манометрические измерители), на изменении сопротивления проводников и полупроводников (терморезисторы) или изменении термоЭДС, возникающей в двух проводниках разной физической природы при наличии разности температур в точках их соединения (термопара).

Диапазон измерения платиновых терморезисторов – от  $-220$  до  $500$  °С, медных – от  $-50$  до  $180$  °С. Статическая характеристика металлических терморезисторов в рабочем диапазоне измеряемых температур практически линейна. Коэффициент преобразования для медных терморезисторов гр. 50М и 100М соответственно  $0,214$  и  $0,428$  Ом/°С, платиновых гр. 50П и 100П соответственно  $0,196$  и  $0,391$  Ом/°С.

Полупроводниковые терморезисторы используют для измерения температуры от  $-90$  до  $180$  °С. В отличие от металлических, статическая характеристика полупроводниковых терморезисторов нелинейная, ее крутизна (коэффициент преобразования) с увеличением температуры падает. Существенный недостаток таких измерительных преобразователей – отсутствие взаимозаменяемости, поэтому их градуировка индивидуальна.

Термоэлектрические измерительные преобразователи (термопары), как и металлические терморезисторы, имеют линейную статическую характеристику. Коэффициент преобразования самых распространенных из них:

хромель-алюмель –  $41 \cdot 10^{-3}$  мВ/°С;

хромель-копель –  $69,5 \cdot 10^{-3}$  мВ/°С;

медь-константан –  $47,5 \cdot 10^{-3}$  мВ/°С.

Диапазон измерения хромель-алюмелевых термопар от  $-50$  до  $100$  °С, а хромель-копелевых – от  $-50$  до  $600$  °С.

В динамическом отношении передаточные функции измерителей температуры распространенных типов могут быть аппроксимированы последовательно включенными инерционным и запаздывающим звеньями

$$W(p) = \frac{k}{T_p + 1} e^{-pt}.$$

Параметры  $k$ ,  $T$  и  $\tau$  в основном зависят от конструкции преобразователя, например, для термопар – от толщины и длины металлической гильзы (чехла), защищающей измерительный преобразователь от механических воздействий или от контактов с измеряемой средой. Так, постоянная времени  $T$  находится обычно в диапазоне от 2 до 10 мин.

Работа dilatометрических и биметаллических измерительных преобразователей основана на различии коэффициентов теплового расширения твердых тел, из которых выполнены чувствительные элементы. В dilatометрическом преобразователе по значению перемещения свободного конца стержня  $S$  судят о температуре  $t$  измеряемой среды.

Свободный конец биметаллического преобразователя изгибается в сторону металла обычно с меньшим коэффициентом линейного расширения. Статическая характеристика биметаллического преобразователя нелинейная. Его динамические характеристики соответствуют характеристикам инерционного звена.

В манометрическом преобразователе изменение температуры окружающей среды  $t$  вызывает изменение давления в замкнутой системе, заполненной жидкостью, парожидкостной смесью или газом. По значению перемещения конца манометрической пружины  $S$  судят о температуре среды, в которую помещен термобаллон. Статическая характеристика этого измерительного преобразователя также нелинейная. В динамическом отношении он подобен инерционному звену.

Класс точности манометрических термометров составляет 1,0...2,5. Диапазон измеряемых температур -160...600°С. Длина капилляра, связывающего термобаллон с манометрической пружинной, до 60 м.

**Измерение уровня.** Чаще всего его осуществляют с помощью поплавка, плотность которого меньше плотности жидкости, или погружного поплавка, плотность которого больше, чем плотность жидкости (см. табл. 4.1). В первом случае поплавок следит за уровнем жидкости, во втором устройство действует по принципу измерения выталкивающей силы, действующей на поплавок.

Кроме поплавковых, применяют также измерители, использующие массу сосуда с жидкостью, гидростатическое давление или зависимость электрического сопротивления от уровня контролируемой жидкости.

В динамическом отношении измерители уровня эквивалентны колебательным звеньям или безынерционным звеньям  $W(p) = S(p)/h(p) = Kh$  с коэффициентом преобразования  $K$ , определяемым конструкцией устройства.

**Измерение расхода.** Это одно из самых сложных и ответственных видов измерений (см. табл. 4.1). Расход измеряют в массовых ( $m$ , кг/с) или объемных ( $V$ , м<sup>3</sup>/с) единицах. Связь между ними определяется соотношением  $m = V\rho$ , где  $\rho$  – плотность измеряемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Расход жидкости или газа при  $\rho = \text{const}$  можно измерить с помощью специально устанавливаемого в трубопроводе сужающего устройства, перепад давления  $\Delta p$  на котором пропорционален расходу среды. Этот перепад измеряется дифференциальным манометром. Расходомер данного типа называют *дроссельным*. В динамическом отношении он эквивалентен безынерционному звену с коэффициентом преобразования

$$K = C\sqrt{\Delta p},$$

где  $C$  – коэффициент, значение которого зависит от геометрической формы и размеров сужающего устройства, диаметра трубопровода и плотности измеряемой среды.

Очевидно, что статическая характеристика этого измерительного устройства нелинейна.

Для измерения количества вещества  $G$ , кг, используют скоростные или объемные счетчики, рабочий орган которых – крыльчатка, вращаемая потоком жидкости. Количество среды, прошедшей через трубопровод, пропорционально частоте вращения крыльчатки, измеряемой интегрирующим прибором.

Принцип действия у счетчиков количества газа аналогичен, но их рабочий орган имеет иную конструкцию, например в виде двух вращающихся овальных шестерен.

Объемный расход жидкости или газа можно также определить по скорости их движения с помощью пневмометрической трубки. Последнюю располагают по оси трубопровода навстречу потоку. Она воспринимает динамический напор  $A\rho$ , равный разности между полным и статическим напором.

Динамический напор измеряют дифференциальным манометром. Он служит для вычисления скорости в измеряемой точке сечения.

Устройства этого типа используют для измерения расхода жидкостей или газов в трубопроводах больших диаметров и некруглого сечения.

**Измерение перемещения.** Его осуществляют с помощью датчиков потенциометрического типа, разных электромашинных устройств или индуктивных преобразователей (см. табл. 4.1).

Преобразователи потенциометрического типа включают в мостовую схему, питаемую постоянным или переменным током.

Электромашинный преобразователь – сельсин представляет собой миниатюрную электрическую машину, состоящую из статора и ротора. На статоре обычно располагают три обмотки, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  по отношению одна к другой; а на роторе – одну обмотку. При использовании сельсинов в трансформаторном режиме одноименные зажимы обмоток статоров сельсинов датчика и приемника соединяют между собой. На обмотку ротора сельсина-датчика подают напряжение переменного тока  $U_{\text{п}}$ , а с ротора сельсина-приемника снимают напряжение  $U$ , значение которого пропорционально синусу угла рассогласования роторов. При этом согласованным является положение, когда оси обмоток роторов сельсинов сдвинуты на  $90^\circ$ .

Дифференциально-трансформаторные преобразователи имеют три обмотки, одна из них, первичная, питается переменным током  $U_{\text{п}}$ , а две другие, вторичные, включены навстречу одна другой. При среднем положении плунжера напряжение  $U$ , индуцируемое во вторичных обмотках, равно нулю. При отклонении плунжера от среднего положения на выходе датчика появляется напряжение переменного тока, значение и фаза которого зависят от значения и направления отклонения.

Статическая характеристика дифференциально-трансформаторного преобразователя в пределах рабочего диапазона линейна.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи – универсальные преобразователи перемещения в электрический сигнал для большой группы измерителей расхода, давления, уровня и других параметров.

В динамическом отношении все преобразователи перемещения представляют собой безынерционные звенья. Коэффициент их преобразования

$$K = U_{\text{п}} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + 0,5R},$$

где  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания схемы, В;  $R_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки, Ом;  $R$  – полное сопротивление преобразователя, Ом.

Коэффициент преобразования, В/рад, сельсинной пары в трансформаторном режиме

$$K = U_{\max} / 57,3$$

где  $U_{\max}$  – максимальное выходное напряжение, В.

Коэффициент преобразования, В/мм, дифференциально-трансформаторного преобразователя

$$K = \frac{2w_2}{w_1} \frac{U}{S_{BX}}$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток преобразователя;  $S_{BX}$  – значение входной величины.

**Измерение частоты вращения.** Его проводят с помощью механических, гидравлических, индукционных, частотных и электрических устройств (см. табл. 4.1).

К механическим измерителям частоты вращения относят центробежные тахометры. При вращении вала тахометра на грузы действует центробежная сила, под действием которой они расходятся, деформируя пружину и перемещая муфту.

В динамическом отношении центробежные тахометры – колебательные звенья.

Параметры их передаточных функций зависят от конструкции измерительного устройства.

К механическим измерителям относят также гироскопы.

Гидродинамические измерители преобразуют угловую скорость вращения в давление жидкости, создаваемое насосом.

В индукционных измерителях входной вал соединен с постоянным магнитом. При вращении магнита в металлическом диске индуцируется ЭДС, которая порождает вихревые токи. От их взаимодействия с полем постоянного магнита возникает момент вращения, значение которого пропорционально частоте вращения входного вала. Действие электромашинных измерителей частоты вращения (электрических тахометров) основано на зависимости развиваемой генератором постоянного тока ЭДС  $U$  от частоты вращения ротора  $n$ .

В динамическом отношении электрический тахометр подобен безынерционному звену с коэффициентом преобразования

$$K = k_K \Phi$$

где  $k_K$  – коэффициент, зависящий от конструкции: числа пар полюсов, числа проводников обмотки якоря и числа параллельных ветвей;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб.

Обычно значение коэффициента передачи тахогенератора находится в пределах  $0,06 \dots 1,15 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{рад}$ .

При измерении частоты вращения рабочих органов мобильных сельскохозяйственных агрегатов часто применяют импульсные измерители скорости, преобразующие угловую скорость в частоту следования импульсов некоторого значения (тока, светового потока, излучения и т.д.). В динамическом отношении эти измерительные устройства также подобны безынерционному звену с коэффициентом передачи  $K = n/2\pi$ , где  $n$  – число зубцов или отверстий вращающегося диска.

Системы безопасности – неотъемлемая часть любого автоматизированного процесса. Их использование позволяет обеспечить правильную работу оборудования и безопасность обслуживающего персонала.

Благодаря развитию науки и внедрению новых технологий, система безопасности на сегодняшний день является эффективным и недорогим средством обеспечения стабильной работы автоматизированных линий. Разработка новых систем контроля и слежения (таких, как системы технического зрения и датчики измерения уровня сыпучих, жидких и газообразных веществ) позволила повысить безопасность работы с оборудованием.

Современные системы безопасности основаны на самых разнообразных датчиках. Датчик, или сенсор, – это первичный преобразователь, элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину в удобный для использования сигнал.

Для обеспечения безопасности на производстве применяются датчики измерения уровня различных типов: перепадомеры, поплавковые, емкостные, радарные, ультразвуковые, лазерные и т.д.

*Перепадомеры* (датчики измерения уровня газов и жидкостей) предназначены для измерения разности давления жидкостных и газообразных средств. Широко используются в различного рода фильтрах на автоматизированных линиях промышленных предприятий.

*Поплавковые датчики* измерения уровня используются в основном для работы с жидкостями. Часто их применяют на водозаборных станциях, в системах канализации – везде, где необходимо поддерживать строго определенный уровень жидкости.

*Емкостные датчики* измерения уровня имеют чувствительный элемент в виде вынесенных к активной поверхности пластин конденсатора. Они могут использоваться для жидких и сыпучих веществ. Приближение объекта к такому датчику влечет за собой изменение емко-



сти конденсатора, что и служит сигналом для включения систем безопасности.

*Ультразвуковые датчики* предназначены для отслеживания технологических процессов и контроля выбросов.

Другим элементом, без которого не обходится практически ни одна система безопасности, являются системы технического зрения.

Системы технического зрения включают в себя камеры-сенсоры, которые имеют блок подсветки блок подсветки. Такие камеры способны быстро отслеживать изменения в объектах за счет высокой скорости «захвата» изображения».

Системы технического зрения идеально подходят для слежения за циклическими производственными процессами.

На сегодняшний день в автоматизированных системах производства для контроля положения, расстояния угла наклона широко применяются датчики, основанные на различных принципах работы. Системы автоматизации могут включать в себя щелевые датчики, датчики расстояния, индуктивные датчики или оптические датчики. Системы автоматизации производства нуждаются в постоянном контроле для того, чтобы избежать аварийных ситуаций. Система производственной безопасности, основанная на сенсорах разного вида, существенно снизит аварийность производства.

Одним из востребованных видов сенсоров являются *датчики расстояния*. Они позволяют определить дистанцию до объекта, тем самым предотвратив столкновение или переполнение емкостей. Датчики расстояния бывают нескольких видов. Индуктивные датчики функционируют на основе принципа вихревых токов, магнитные датчики реагируют на изменение напряжения магнитного поля, оптические датчики используют в своей работе триангуляционный принцип.

*Щелевые датчики* относятся к оптическим сенсорам. Они используются для обнаружения цветных полиграфических меток на поверхности или упаковке объектов. Современные щелевые датчики поддаются тонкой настройке, позволяющей учитывать все факторы, влияющие на их работу.

Щелевые датчики совмещают в своем корпусе приемник и излучатель. Излучатель посылает световой луч в сторону приемника, приемник улавливает свет излучателя. Когда объект частично или полностью перекрывает луч, датчик срабатывает.

*Оптические датчики*, измеряющие расстояние, отличаются разнообразием конструкторских решений. В них могут быть использованы лазерные интерферометры, датчики с рассеянным отражением света и оптические датчики радарного типа.

*Датчики расстояния*, основанные на оптике, имеют свои достоинства и недостатки. Например, оптические датчики с лазерными интерферометрами отличаются большим диапазоном и высокой точностью измерений. Но такой тип сенсоров дорог и сложен в эксплуатации.

*Индуктивные датчики*, срабатывающие за счет изменения параметров магнитного поля, которое создает катушка индуктивности внутри датчика, недороги и надежны. Они широко применяются во всех видах производства. Однако недостатком таких датчиков является их небольшая зона контроля и низкая чувствительность к немагнитным объектам.

*Датчики контраста* нужны при определении контрастных маркеров таких, как, например, штриховые коды. Основопологающим фактором считываемости штрих-кода является разница контраста между полосами и фоном. Принцип работы датчиков контраста подобен фотоэлектрическим датчикам измерения расстояния. Этот принцип основан на измерении скорости прохождения луча, отражающегося от специальной метки, которая расположена на объекте или же непосредственно от самого объекта. При помощи лазерного или красного луча датчик DT 50 измеряет точное расстояние до объекта бесконтактным методом. Лазерный датчик положения также измеряет расстояние до объекта.

Отличаются лазерные датчики большим рабочим диапазоном и высоким разрешением. Лазерные датчики имеют следующие преимущества перед другими видами оптических датчиков: большая дальность срабатывания; удобство юстировки лазерного датчика; защита от засветки (узкий спектр лазерного луча, который позволяет настроить лазерный датчик на срабатывание только от отраженного луча либо от излучателя). Лазерный датчик, работая в импульсном режиме, позволяет увеличить помехозащищенность.

*Фотоэлектрический датчик* нашел применение во многих областях промышленности: от решения задач предотвращения столкновений автоматически движущихся транспортных средств, расположения кранов до мониторинга уровня заполненности резервуаров и предотвращения провисания лент конвейера.

*Вилочные датчики* предназначены для сканирования меток, наклеек, распознавания лишних листов пленки или бумаги, определения изъянов в изделиях на поточной линии и т.д. Вилочные датчики на станках по наклейке этикеток сканируют ленту с целью выявления пробелов, гарантируют наличие этикетки на упаковке. При производстве самих наклеек вилочный датчик просматривает ленту, определяя брак и пустоты.

Перед тем как идентифицировать объект, необходимо его сначала обнаружить, и для этого необходимы различные *фотодатчики*. Состоит фотодатчик из преобразователя сигнала, усилителя сигнала, источника излучения и фотоприемника. Приемник исследует поступивший световой поток, передает сигнал на усилитель и далее на исполнительное устройство.

Фотодатчик обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами датчиков. Диапазон его действия намного превосходит индуктивные, емкостные и другие виды датчиков. Фотодатчики могут решать практически любые задачи, благодаря многочисленным вариантам конструкций корпуса и высокой чувствительности даже при миниатюрном исполнении. Фотодатчики широко применяются для регистрации движущихся объектов, в автоматике для контроля угловых и линейных перемещений, например в принтерах, сканерах и в других сферах.

*Датчики для определения полимерных пленок и стекла* имеют модуль передатчика и модуль приемника в одном корпусе. Передатчик излучает луч света, который возвращается к приемному модулю с помощью призматического отражателя.

*Датчики взрывозащищенные* обеспечивают безопасность производства, способствуя предотвращению взрывов, пожаров, утечек ядовитых газов. Такие датчики рассчитаны на работу в агрессивных средах, поэтому обладают особо высокими прочностными и качественными характеристиками. Используются датчики взрывозащищенные в нефтегазовой, химической и других областях промышленности для подачи извещения о пожаре.

*Датчики изображения* контролируют свойства объекта, которые нельзя определить другими типами датчиков. Бесспорно, что датчики изображения являются более дорогостоящими, обладают большими возможностями и сложнее в эксплуатации, чем фотоэлектрические датчики. Благодаря достижениям технологии появилась возможность упрощения установки и применения датчиков изображения.

*Оптоэлектронные датчики* применяются для навигации автоматических подъемников между многоярусными складскими стеллажами. Оптоэлектронные датчики детектируют маркеры, которые установлены на полках стеллажей, конвертируют сигнал в электрический и передают его головной станции управления.

Инкрементный преобразователь угловых перемещений предназначен для измерения угловых перемещений при помощи оптоэлектронного датчика и может быть использован в автоматизированных электроприводах вместо инкрементных датчиков, вращающихся трансформаторов и тахогенераторов.

Датчик контроля сдвоенных листов для полиграфического и стале-прокатного производства контролирует толщину бумаги и при подаче сдвоенного листа открывает клапан ловушки, куда их сбрасывает.

*Интеллектуальные датчики* и сенсорные системы, которые предназначены для автоматизации производственных и технологических процессов. Для достижения максимальной эффективности интеллектуальные датчики способны непрерывно регулировать свою чувствительность и самостоятельно подстраиваться под условия эксплуатации. Интеллектуальные датчики характеризуются следующими признаками: автономный режим работы от нескольких часов до нескольких месяцев; обработка и хранение больших объемов входных данных; устойчивость к воздействию внутренних, внешних помех и сбоев; повышение точности датчиков и коррекция погрешностей; самотестирование; самообучение с элементами искусственного интеллекта; коммутация (интерфейсы передачи данных).

*Энкодеры* применяются для решения одной из самых главных задач в области промышленной автоматизации – измерения линейных и угловых перемещений. Кроме того, при измерении скорости и ускорения энкодеры незаменимы. Автоматика позволяет существенно ускорить однообразные технологические операции. С помощью использования современных технических средств автоматизация складов или производственных процессов не составляет труда. Однако автоматика нуждается в постоянном контроле во избежание сбоев в работе или серьезных аварий.

Автоматизация складов – это не только автоматический учет и сортировка поступающей и отгружаемой продукции, но и обеспечение безопасности обслуживающего персонала. Безопасность обеспечивается за счет перекрытия доступа персонала в потенциально опасные зоны и за счет поддержания штатного режима работы оборудования.

Автоматизация складов и систем безопасности строится на основе датчиков. Датчики осуществляют первичную обработку информации и посылают сигналы управляющим системам. Автоматика в случае возникновения аварийных ситуаций принимает меры по их устранению.

Одними из распространенных датчиков, встраиваемых в автоматические системы безопасности и контроля, являются энкодеры.

Энкодеры, или датчики угла поворота и скорости вращения, подразделяются на инкрементальные энкодеры и абсолютные энкодеры. Абсолютные энкодеры в свою очередь делятся на оптические и магнитные.

Инкрементальные энкодеры определяют скорость вращения и угла поворота вращающихся объектов по количеству импульсов за один

оборот. Величина угла поворота объекта находится с помощью подсчёта импульсов от старта. Для вычисления угловой скорости объекта процессор сравнивает дифференцирование количества импульсов во времени. Таким образом, инкрементальные энкодеры показывают величину скорости, то есть число оборотов в минуту.

Оптические абсолютные энкодеры имеют жёстко закрепленный на валу стеклянный диск, на который нанесена оптическая шкала. Когда объект вращается, датчик считывает информацию, а электроника преобразовывает её в последовательность дискретных электрических импульсов.

Магнитные абсолютные энкодеры регистрируют прохождение магнитных полюсов вращающегося объекта непосредственно вблизи чувствительного элемента датчика.

Инкрементальные и абсолютные энкодеры крепятся к вращающимся объектам посредством нормального или полого вала. Вал вращающегося объекта и вал энкодера соединяют механически с помощью соединительной муфты.

*Бесконтактные выключатели* – это полупроводниковые преобразователи, управляющие состоянием внешней цепи нагрузки при помощи встроенного коммутационного элемента. Бесконтактные выключатели реагируют на положение объекта воздействия, причем считывание информации об объекте происходит дистанционно.

В системах автоматического контроля и безопасности бесконтактные выключатели выполняют функцию первичных преобразователей для контроля положения рабочих элементов оборудования. Они сигнализируют о завершении выполнения команды на перемещение. Возможны и другие варианты использования бесконтактных выключателей.

Бесконтактные выключатели основаны на самых разнообразных по техническому решению датчиках. Это могут быть ультразвуковые датчики, энкодеры, датчики движения, датчики температуры, реле и автоматика.

Датчик перемещения используется для измерения относительных и абсолютных перемещений посредством преобразования перемещения в электрический сигнал. Датчики линейных перемещений – это бесконтактные линейные преобразователи, которые используют принцип магнитострикции. Этот датчик линейных перемещений не имеет электро-механических подвижных контактов, что исключает его износ и гарантирует почти неограниченный срок службы.

Датчики угловых перемещений изменяют механические угловые перемещения в электрические сигналы. Датчики углового перемещения находят широкое применение в измерениях угловых скоростей, углов,

линейных перемещений. Датчики углового перемещения делятся на два вида: инкрементальные датчики и датчики абсолютного положения. Инкрементальные датчики создают информацию относительно положения и угла объекта в виде электрических импульсов, которые соответствуют положению вала. Когда вал неподвижен, передача импульсов прекращается. Инкрементальные датчики перемещения имеют основной рабочий параметр – количество импульсов на вращение.

Датчики абсолютного положения на выходе обеспечивают информацию об абсолютном угловом положении вала. Их преимущество состоит в том, что эти датчики перемещения непосредственно выдают информацию о текущем значении угла и его не требуется вычислять. Датчики угловых перемещений и линейных применяются: для определения размеров, форм и габаритов объекта, определения наличия местоположения и расстояния до объектов, измерения скорости вращения, подсчета количества объектов.

Датчики перемещения с аналоговым выходом используются для точных измерений перемещений. Исключить электрический контакт в подвижных частях датчика позволяет индуктивный принцип преобразования.

Потенциометрические датчики перемещения используются для проверки и контроля механических перемещений, прямого измерения. Такие датчики перемещения не подвержены внешним электромагнитным полям, вибрационным, ударным нагрузкам даже при высоких скоростях и уровнях вибрации. Потенциометрические датчики перемещения применяются в выключателях и кнопках, гидравлических цилиндрах, для измерения деформаций, изгиба, измерения растяжения в машинах, на производственных линиях и испытательных стендах.

#### 4.3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Устройство, которое воспринимает разность между текущим и заданным значениями регулируемой величины и преобразует ее в воздействие на РО в соответствии с заложенным в регулятор законом регулирования, называют *автоматическим регулятором*.

Напомним, что элементы типового регулятора – это измерительный преобразователь, задатчик, усилитель и собственно регулирующее устройство, которое вырабатывает сигнал рассогласования текущего и заданного значений регулируемой величины, усиливает его и корректирует в соответствии с законом регулирования, вырабатывая сигнал регулирующего воздействия.

Большинство систем автоматического регулирования включает также ИМ, преобразующий командный сигнал от регулятора в соответствующее воздействие на РО.

Основные типы регуляторов – позиционные и непрерывного действия. Последние, в свою очередь, делят на пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Характеристики автоматических регуляторов**

Закон	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция	Передаточная характеристика	АФЧХ	Параметры настройки
П	$X(t) = k_p y(t)$	$k_p$			$k_p$
И	$X(t) = k_{PI} \int y(t) dt$	$\frac{k_{PI}}{p}$			$k_{PI}$
ПД	$X(t) = k_p [y(t) + T_{np} \frac{dy(t)}{dt}]$	$k_p(1 + T_{np} p)$			$k_p, T_{np}$
ПИ	$X(t) = k_p [y(t) + \frac{1}{T_n} \int y(t) dt]$	$k_p \left( \frac{1 + T_n p}{T_n p} \right)$			$k_p, T_n$
ПИД	$X(t) = k_p [y(t) + \frac{1}{T_n} \int y(t) dt + T_{np} \frac{dy(t)}{dt}]$	$k_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_{np} p \right)$			$k_p, T_n, T_{np}$

**Пропорциональный (П) регулятор.** Он перемещает РО на значение  $x$ , пропорциональное отклонению регулируемой величины  $y$  от заданного значения.

Дифференциальное уравнение регулятора ( $p$  означает запись в операторной форме)

$$x(p) = k_p y(p).$$

Таким образом в динамическом отношении П-регулятор подобен безынерционному (пропорциональному) звену.

Параметр настройки П-регулятора – коэффициент пропорциональности  $k_p$ , равный перемещению РО  $x$  при отклонении регулируемой величины  $y$  на единицу ее изменения.

При выборе структурной схемы любого реального регулятора, в том числе и пропорционального, решающее значение имеет передаточная функция (ПФ) исполнительного механизма, которая может соответствовать ПФ интегрирующего или пропорционального звена. К первой группе относятся электродвигательные ИМ, обеспечивающие постоянную скорость перемещения РО, ко второй – пневматические мембранные ИМ, у которых перемещение РО пропорционально регулирующему воздействию.

Структурная схема П-регулятора с ИМ первого типа приведена на рисунке 4.2, а. Закон регулирования формируется с помощью отрицательной обратной связи (ОС) по положению РО, т. е. на вход устройства ОС  $W_{oc}(p)$  поступает сигнал  $x$  с преобразователя перемещения ИМ.

В соответствии с правилами преобразования структурных схем ПФ регулятора имеет вид

$$W_p(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{W_{yc}(p)W_{им}(p)}{1 + W_{yc}(p)W_{им}(p)W_{oc}(p)}.$$

При большом коэффициенте усиления  $W_{yc}(p)$  ПФ упрощается:

$$W_p(p) \approx \frac{1}{W_{oc}(p)}. \quad (4.1)$$

Для того чтобы формула (4.1) была тождественна ПФ идеального П-регулятора  $W_p(p) = k_p$ , необходимо выполнить условие  $W_{oc}(p) = 1/k_p$ .

Таким образом, ОС должна быть выполнена в виде безынерционного звена с коэффициентом усиления  $k_{oc}(p) = 1/k_p$ . Такую ОС называют *жесткой*. Соответственно параметр настройки П-регулятора – коэффициент пропорциональности  $k_p$  задается параметрами звена ОС.

Переходная характеристика реального П-регулятора несколько отличается от характеристики идеального в начальной своей части из-за ограниченной скорости ИМ.

Пропорциональные регуляторы позволяют устойчиво работать практически в любых технологических системах. Однако их недостаток – зависимость регулируемой величины от нагрузки объектов.



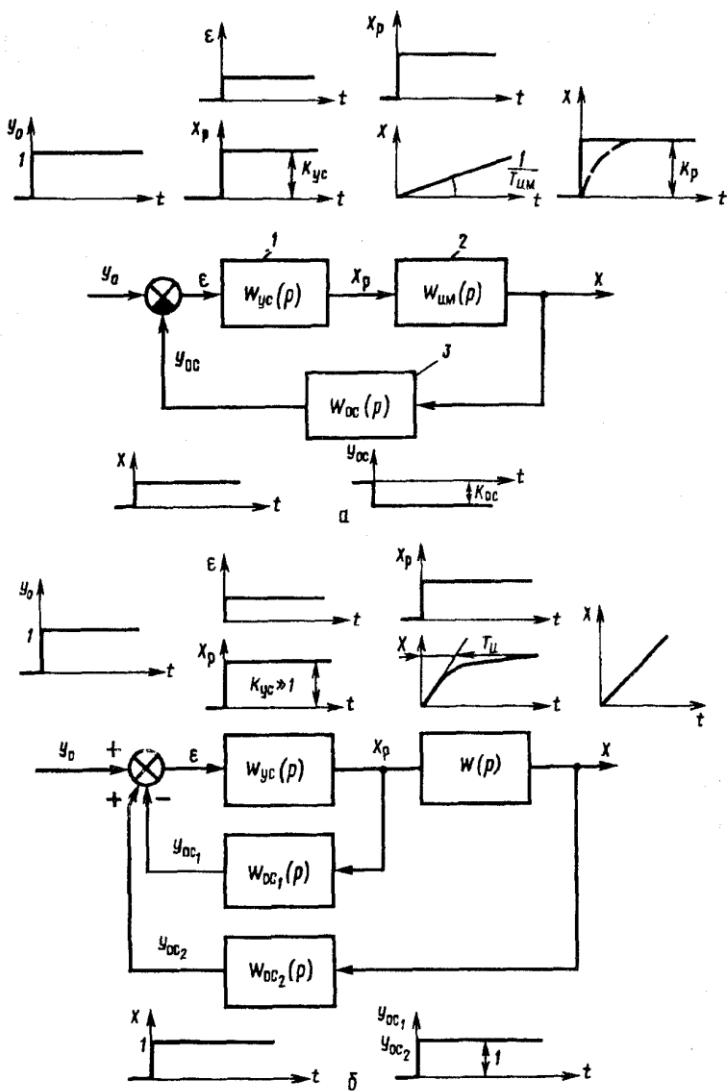


Рис. 4.2. Структурные схемы П-регулятора (а) и И-регулятора (б):  
 1 – усилитель; 2 – исполнительный механизм; 3 – цепь обратной связи

**Интегральный (И) регулятор.** Он перемещает РО пропорционально интегралу от сигнала рассогласования,

Уравнение регулятора (в операторной форме)

$$x(p) = \frac{k_{p1}}{p} y(p).$$

Таким образом, в динамическом отношении И-регулятор подобен интегрирующему звену. Параметр настройки И-регулятора  $k_{p1}$  – коэффициент пропорциональности – характеризует зависимость скорости перемещения регулирующего органа от значения отклонения регулируемого параметра.

Структурная схема серийного П-регулятора показана на рисунке 4.2, б. Передаточные функции элементов схемы определяются следующими выражениями:

$$W_{yc}(p) = k > 1; \quad W(p) = \frac{1}{T_{и}p + 1}; \quad W_{oc1}(p) = W_{oc2}(p) = 1. \quad (4.2)$$

Передаточная функция всей схемы

$$W(p) = \frac{W_{yc}(p)W(p)}{1 + W_{yc}(p)W_{oc1}(p) - W_{yc}(p)W(p)W_{oc2}(p)}. \quad (4.3)$$

После подстановки в формулу (4.3) значений ПФ из формулы (4.2), деления числителя и знаменателя на  $k$  и отбрасывания за малостью  $1/k$  получаем ПФ И-регулятора ( $T_{и}$  – постоянная времени ИМ, величина, обратная  $k_{p1}$ ):

$$W(p) = 1/T_{и}p.$$

И-регуляторы поддерживают параметр без его отклонений, однако могут устойчиво работать только на объектах, имеющих значительное самовыравнивание.

**Пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор.** Он перемещает РО на значение  $X$ , пропорциональное сумме отклонения и скорости (дифференциала) отклонения регулируемой величины  $y(p)$ .

Уравнение регулятора (в операторной форме)

$$x(p) = k_p(1 + T_d p)y(p).$$

Таким образом, в динамическом отношении ПД-регулятор подобен системе из двух параллельно включенных звеньев: безынерционного с

коэффициентом пропорциональности  $k_p$  и дифференциального с коэффициентом  $k_p T_d$ .

**Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор.** Он перемещает РО на величину  $X$ , пропорциональную сумме отклонения и интеграла от отклонения регулируемой величины  $y$ .

Уравнение регулятора (в операторной форме)

$$x(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) y(p).$$

Таким образом, в динамическом отношении ПИ-регулятор подобен системе из двух параллельно включенных регуляторов: пропорционального с коэффициентом пропорциональности  $k_p$  и интегрального с коэффициентом пропорциональности  $k_p/T_i$ . Отсюда следует, что у ПИ-регулятора два параметра настройки: коэффициент пропорциональности  $k_p$  и время удвоения  $T_i$ . При этом  $T_i$ , как следует из данных таблицы 2, может быть определено как время, за которое выходной сигнал регулятора  $X$  изменяется от  $k_p$  до  $2k_p$  т. е. удваивается.

Структурная схема ПИ-регулятора показана на рисунке 4.3 в двух вариантах: с охватом и без охвата ИМ отрицательной ОС.

В первом варианте (рис. 4.3, а) устройство ОС должно иметь характеристику реального дифференцирующего звена

$$W_{ос}(p) = k_d \frac{T_d p}{T_d p + 1},$$

где  $k_d$  и  $T_d$  – коэффициент усиления и постоянная времени дифференцирующего звена.

Тогда, как было отмечено выше, при достаточно большом коэффициенте усиления  $W_{yc}(p)$  ПФ регулятора

$$W_p(p) = \frac{1}{k_d} \frac{T_d p + 1}{T_d p}, \text{ или } W_p(p) = k_p \frac{T_i p + 1}{T_i p},$$

если принять  $T_d = T_i$  и  $k_p = 1/k_d$ .

Таким образом, в первом варианте исполнения регулятора ПФ исполнительного механизма не влияет на формирование закона регулирования, который полностью определяется характеристикой устройства ОС. В серийных ПИ-регуляторах этого типа в качестве ОС используют различные электрические, пневматические или гидравлические устрой-

ства – аналоги реально дифференцирующего звена. Такую ОС называют *упругой* или *гибкой*.

Во втором варианте исполнения ПИ-регулятора (рис. 4.3, б) возможны два случая, когда исполнительный механизм имеет характеристику интегрирующего или пропорционального звена.

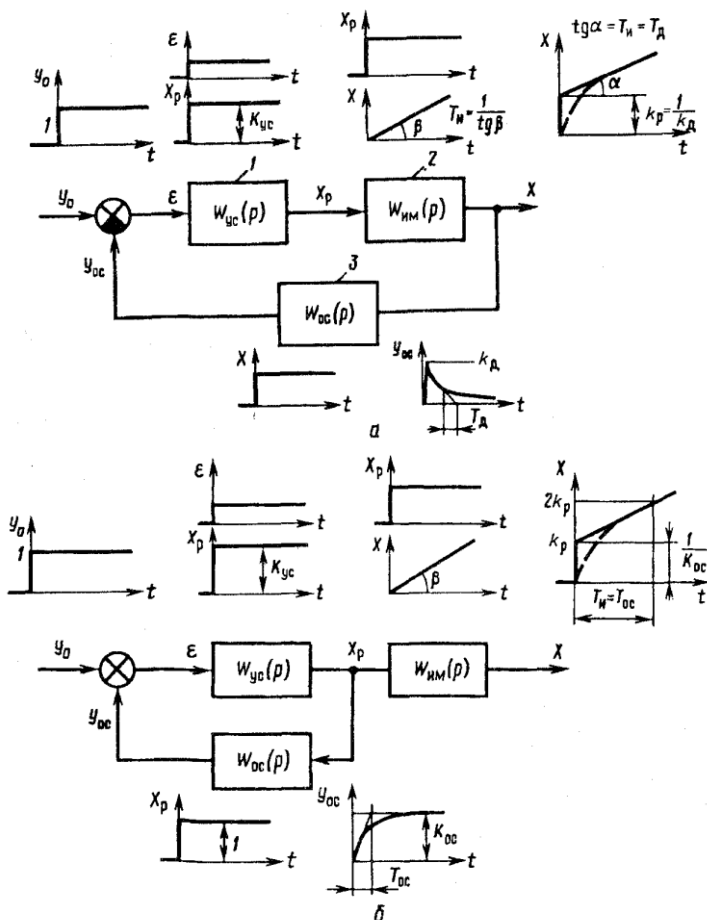


Рис. 4.3. Структурные схемы ПИ-регулятора с охватом (а) и без охвата (б) ИМ цепью отрицательной связи:

1 – усилитель; 2 – исполнительный механизм; 3 – обратная связь

В обоих случаях при достаточно большом коэффициенте усиления  $W_{yc}(p)$  имеем

$$W_{yc}(p) = \frac{1}{W_{oc}(p)} W_{им}(p).$$

Если,  $W_{им}(p) = \frac{1}{T_{oc}p}$ , а ОС выполнена в виде аperiodического

звена 1-го порядка  $W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}(p) + 1}$ , то получаем ПФ ПИ-регулятора

$$W_p(p) = \frac{1}{k_{oc}} \frac{T_{oc}p}{T_{oc}p + 1} = k_p \frac{T_{и}p + 1}{T_{и}p},$$

где оба параметра настройки  $k_p = 1/k_{oc}$  и  $T_{и} = T_{oc}$  также определяют-ся параметрами узла ОС.

Если у ИМ характеристика пропорционального звена, то для реализации ПИ-регулятором закона регулирования звено ОС должно иметь характеристику реального дифференцирующего звена.

При увеличении постоянной времени  $T_{и}$  такой ПИ-регулятор превращается в П-регулятор, а устройство ОС – в безынерционное звено.

В большинстве серийно выпускаемых электрических регуляторов, использующих ИМ с постоянной скоростью перемещения и имеющих структурную схему, представленную на рис. 4.3, б, в качестве второй ступени усиления используют трехпозиционный релейный элемент.

Такой принцип реализован в большом числе регуляторов, используемых в сельскохозяйственном производстве (Р-25, РС-29, РП-4 и др.).

ПИ-регуляторы, отличаясь простотой конструкции, обеспечивают высокое качество стабилизации параметра независимо от нагрузки объекта.

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.** Он перемещает РО пропорционально отклонению, интегралу и скорости отклонения регулируемой величины.

Уравнение регулятора (в операторной форме)

$$x(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{и}p} + T_{д}p \right) y(p).$$

Таким образом, в динамическом отношении ПИД-регулятор подобен системе из трех параллельно включенных звеньев: пропорционального – с коэффициентом пропорциональности  $k_p$  интегрального – с  $k_p/T_{и}$  и дифференцирующего –  $k_p T_{д}$ .

Соответственно у ПИД-регулятора три параметра настройки: коэффициент пропорциональности  $K_p$ , время интегрирования  $T_{и}$ , и время дифференцирования  $T_{д}$ .

На практике аналоговый ПИД-регулятор выполняют по той же структурной схеме, что и ПИ-регулятор (рис. 4.3, а), но устройство ОС  $W_{ос}(p)$  в этом случае должно иметь ПФ вида апериодического звена второго порядка. Обычно ПИД-закон регулирования реализуют путем включения последовательного корректирующего устройства в виде интегрально-дифференцирующего звена.

**Позиционный (релейный) регулятор.** Он вырабатывает сигнал, который перемещает РО в одно из фиксированных положений (позиций). Этих положений может быть два, три и более, соответственно различают двух-, трех- и многопозиционные регуляторы.

Уравнение автоматической системы регулирования с позиционным регулятором определяется статической характеристикой регулятора.

Статическая характеристика наиболее распространенного из этой группы регуляторов – двухпозиционного показана на рисунке 4.4, а.

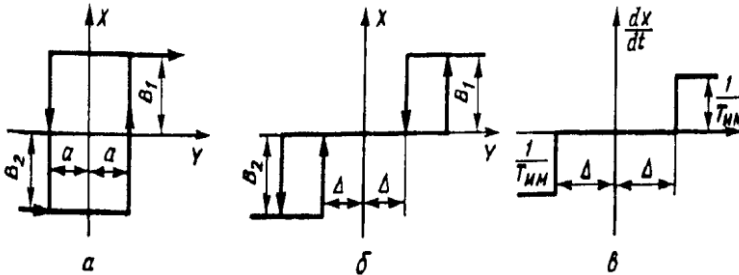


Рис. 4.4. Статические характеристики позиционных регуляторов (а...в)

Величина  $2a$  определяет зону неоднозначности регулятора. При изменении входной величины  $y$  (она же – выходная величина объекта) относительно заданного значения на  $a$  выходная величина  $X$  (регулирующее воздействие) скачком достигнет своего максимального значения  $B_1$ . При уменьшении  $X$  на то же значение  $a$  выходная величина также скачком достигнет значения  $B_2$ , причем в общем случае  $B_1 \neq B_2$ .

Таким образом, двухпозиционные регуляторы имеют два параметра настройки: зона неоднозначности  $2a$  и регулирующее воздействие  $B$ .

Характерная особенность системы регулирования с двухпозиционным регулятором – автоколебательный характер изменения регулируемой величины  $y$ . Параметры автоколебаний – амплитуда  $A_k$  и период  $T$  зависят от свойств объекта регулирования ( $T_{об}$ ,  $K_{об}$ ,  $\tau$ ) и параметров настройки регулятора.

Трехпозиционные регуляторы (рис. 4.4, б) в отличие от двухпозиционных кроме двух устойчивых положений – «больше»  $B_1$  и «меньше»  $B_2$  – обеспечивают еще и третье – «норма». Органы настройки трехпозиционного регулятора позволяют устанавливать зону нечувствительности  $2\Delta$  и значение регулирующего воздействия  $B$ .

Преимущества трехпозиционного регулирования перед двухпозиционным заключаются в отсутствии автоколебаний при изменении  $-\Delta < y < +\Delta$  и малом значении амплитуды колебаний регулируемой величины.

Позиционные регуляторы могут работать также и с ИМ, обеспечивающими постоянную скорость перемещения РО. Статическая характеристика такого регулятора приведена на рисунке 4.4, в. В соответствии с этой характеристикой скорость перемещения РО  $dx/dy$  изменяется скачкообразно, достигая значения  $1/T_{им}$ , где  $T_{им}$  – время полного хода ИМ.

Релейные регуляторы кроме зоны нечувствительности имеют также и зону неоднозначности.

Системы автоматического регулирования с позиционными регуляторами применяют при автоматизации ТП сельскохозяйственного производства. Это стало возможным благодаря таким их *преимуществам*, как простота технических способов управления энергетическими потоками, удобство сочетания релейного элемента с ИМ постоянной скорости, перемещающим РО, а также благодаря дешевизне, надежности и простоте настройки самих регулирующих устройств.

#### 4.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Устройство, преобразующее управляющий сигнал регулятора в перемещение РО, называют *исполнительным механизмом*. Такое устройство обычно состоит из исполнительного двигателя, передаточного или преобразующего узла (например, редуктора), а также систем защиты, контроля и сигнализации положения выходного элемента, блокировки и отключения. Передаточная функция ИМ входит в ПФ регулятора, и потому ИМ должен обладать достаточным быстродействием и точностью,

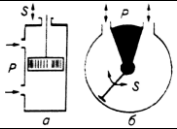
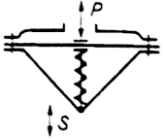
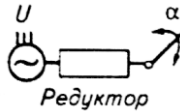
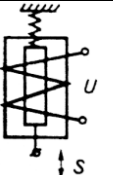
с тем чтобы осуществлять перемещение РО с возможно меньшим искажением закон регулирования.

Наиболее характерна классификация ИМ по виду потребляемой энергии (табл. 4.3) на гидравлические, пневматические и электродвигательные или электромагнитные.

**Гидравлические ИМ.** Они состоят из управляющего и исполнительного элементов. Обычный вариант первого элемента – золотник, второго – гидроцилиндр. Последний, в свою очередь, реализует поступательное (а) или вращательное (б) движение выходного вала (табл. 4.3). В гидравлических ИМ входная величина – перемещение управляющего устройства или давление жидкости на поршень  $p$ , а выходная – перемещение (поворот) выходного вала  $S$ .

Таблица 4.3

**Исполнительные механизмы**

Схема	Наименование	Вход	Выход	Выходная мощность, Вт
	Поршневые двигатели с поступательным (а) и вращательным (б) движением поршня	Давление 0,1...10МПа	Механическое перемещение	$10^2 \dots 5 \cdot 10^4$
	Пневматический мембранный двигатель	Давление 0,1...0,5МПа	То же	До 200
	Электродвигательный исполнительный механизм	Напряжение	Механическое вращение	До $4 \cdot 10^4$
	Электромагнит-соленоид	То же	Механическое перемещение	До $1,4 \cdot 10^3$

Постоянная времени реального гидравлического ИМ при больших скоростях перемещения поршня сильно возрастает, что объясняется резким увеличением сил поршня вязкого трения, но все-таки с достаточной точностью его характеристики совпадают с характеристиками интегрирующего звена, постоянная времени которого прямо пропорци-



ональна площади поршня и обратно пропорциональна  $\sqrt{p_1 - p_2}$ , где  $p_1$  и  $p_2$  – давление нагнетания и слива рабочей жидкости.

Гидравлические ИМ обладают очень большим быстродействием и выходной мощностью, и потому их применяют в системах автоматизации мобильных сельскохозяйственных машин и агрегатов.

**Пневматические ИМ.** По устройству аналогичны гидравлическим. Они получили широкое распространение благодаря высокой надежности, простоте конструкции и возможности получения достаточно больших усилий.

Крутизна статической характеристики пневматического ИМ находится в прямой зависимости от площади мембраны и в обратной – от коэффициента жесткости пружины (несколько возрастает по мере ее сжатия). Соответственно при малых изменениях выходного параметра  $S$  динамику механизма можно представить характеристиками безынерционного звена, причем коэффициент передачи которого несколько убывает с увеличением  $S$ .

Общие недостатки пневматических и гидравлических ИМ – сложность операций по их наладке и главное – необходимость специальных компрессорных (насосных) установок для их питания.

**Электродвигательные ИМ.** В них используют электродвигатели постоянного и переменного тока, в том числе асинхронные двухфазные с полым ротором, с конденсаторами в цепи обмотки управления, а также асинхронные трехфазные двигатели. Исполнительные двигатели постоянного тока имеют независимое возбуждение или возбуждение от постоянных магнитов. Управляют этими двигателями, изменяя напряжение на якоре или на обмотке возбуждения (якорное или полюсное управление).

В большинстве конструкций электрических ИМ применяют двухфазные и трехфазные асинхронные двигатели.

Асинхронный двухфазный двигатель приближенно можно рассматривать как инерционное звено, если выходная величина – угловая скорость ротора, или как два последовательно соединенных звена – интегрирующее и инерционное, если выходная величина – угол  $\alpha$  поворота ротора (табл. 4.3).

Значение коэффициента передачи зависит от способа управления двигателем, а постоянная времени – от сигнала управления, возрастая с уменьшением пускового момента двигателя от 0,1 до 0,2 с (для полого ротора с обмоткой типа «беличьей клетки»).

Передаточная функция асинхронного трехфазного двигателя совпадает с ПФ инерционного звена.

Коэффициент преобразования и постоянную времени определяют по механической характеристике двигателя и рабочей машины. Большинство электродвигательных ИМ работает в режиме, когда скорость перемещения не зависит от значения отклонения регулируемого параметра от заданного. Такой ИМ состоит из асинхронного электродвигателя, редуктора, концевых и путевых выключателей, датчиков (преобразователей), тормозного устройства и ручного привода.

Электродвигатель с редуктором служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для перемещения РО.

Концевые выключатели используют для отключения пускателя при достижении РО крайних положений, а путевые выключатели – для ограничения диапазона перемещения РО в автоматическом режиме.

Датчики положения формируют сигнал, пропорциональный углу поворота выходного вала ИМ. Этот сигнал используется индикатором положения на пульте оператора, а также возможен в качестве сигнала ОС по положению ИМ (для формирования П-закона регулирования, например).

Ручной привод обеспечивает возможность ручной перестановки РО при нарушениях работы электрической части механизма.

Включение-отключение электродвигателя по команде регулирующего устройства осуществляется посредством электромагнитного или полупроводникового релейного устройства-пускателя.

Реверс электродвигателя электромагнитного ИМ с трехфазным электродвигателем обеспечивается изменением схемы подключения двух фаз.

После размыкания силовых контактов (рис. 4.5, *a*) и отключении напряжения питания электродвигателя выходной вал ИМ останавливается не сразу, а продолжает в течение некоторого времени движение по инерции. Так называемый «выбег» может существенно ухудшать качество регулирования. Уменьшают выбег с помощью тормоза, представляющего собой электролитический конденсатор  $C$ , подключаемый через размыкающие блок-контакты КМ1 и КМ2 к одной из статорных обмоток электродвигателя. В результате этого в статорной обмотке появляется ток, наводящий в статоре магнитное поле, которое, взаимодействуя с вращающимся ротором, создает противодействующий вращению тормозной момент, уменьшающий выбег ИМ.

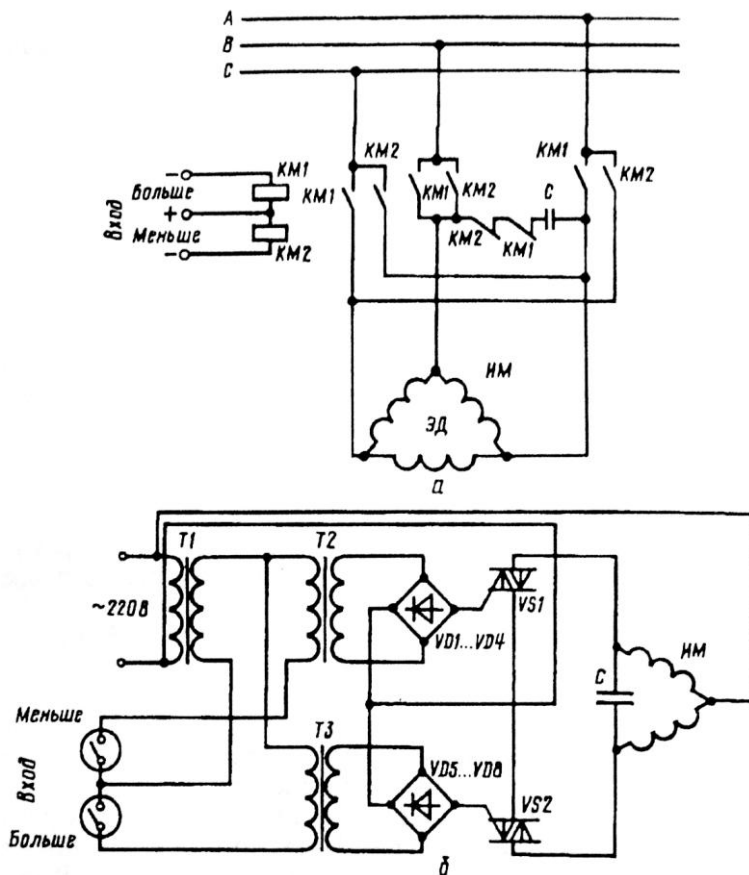


Рис. 4.5. Схемы управления ИМ:

а – с трехфазным асинхронным электрическим двигателем; б – с однофазным конденсаторным электрическим двигателем

Главный недостаток электромагнитного релейного пускового устройства – невысокая надежность. Значительно лучшие характеристики имеет полупроводниковое релейное устройство (рис. 4.5, б).

Основу устройства составляют два тиристорных ключа на симисторах VS1 и VS2, которыми управляют с помощью сигналов «Больше» – «Меньше», вырабатываемых регулятором или оператором. Каждый из тиристорных ключей включен в цепь питания одной из статорных обмоток электродвигателя.

При отсутствии управляющих сигналов тиристорные ключи разомкнуты и электродвигатель неподвижен.

Включение симистора происходит в результате подачи на управляющий электрод отрицательного напряжения, вырабатываемого соответствующим выпрямительным мостом, питаемым от разделительного трансформатора  $T2$  ( $T3$ ) при наличии командного сигнала от регулятора или оператора.

Трансформатор  $T1$  разделяет управляющие и силовые цепи. Реверсирование электродвигателя осуществляется изменением схемы подключения обмоток, при этом одна обмотка подключается к сети непосредственно, а вторая – через фазосдвигающий конденсатор  $C$ .

Таким образом, движение ИМ может быть описано системой уравнений, соответствующих движению ИМ в сторону открытия, неподвижному состоянию и движению в сторону закрытия,

$$\begin{cases} T_{ИМ} \frac{dy}{dt} = 1 & \text{при } x > 0 \\ T_{ИМ} \frac{dy}{dt} = 1 & \text{при } -\Delta < x < \Delta \\ T_{ИМ} \frac{dy}{dt} = 1 & \text{при } x < -\Delta \end{cases}$$

где  $T_{ИМ}$  – время, равное времени движения ИМ из одного крайнего положения в другое;  $\Delta$  – зона нечувствительности релейного устройства.

Характеристика ИМ – существенно нелинейная, но линейные законы регулирования могут быть реализованы и с этим механизмом при использовании регулятора с импульсным выходом.

**Электромагнитные ИМ.** Они представляют собой соленоиды и электромагнитные муфты. Соленоидный ИМ – это катушка, втягивающее усилие которой при подаче управляющего сигнала  $U$  перемещает якорь на расстояние  $S$ , преодолевая сопротивление пружины.

Статическая характеристика электромагнитных ИМ, как правило, нелинейная, и их используют в системах позиционного регулирования.

Электромагнитные муфты могут быть фрикционными, порошковыми или асинхронными. Фрикционная муфта состоит из двух полумуфт, посаженных на ведущий и ведомый валы. В одной из полумуфт расположена обмотка возбуждения. При подаче на нее напряжения полумуфты сдвигаются и возникающая сила трения приводит их в движение. Такие муфты также применяют в системах позиционного регулирования и защиты оборудования при аварийных нарушениях его работы.

Принцип действия порошковой муфты основан на изменении вязкости ферромагнитной массы, заполняющей муфту. При подаче на катушку напряжения вязкость ферромагнитной массы возрастает и передаваемый момент увеличивается.

В муфтах скольжения момент вращения передается посредством магнитного поля, создаваемого обмоткой, расположенной на ведущей полумуфте. При ее вращении в ведомой полумуфте, как в роторе асинхронного двигателя, индуцируется ток, от взаимодействия которого с магнитным полем возникает момент вращения, увлекающий ведомую полумуфту за ведущей.

Порошковые и асинхронные электромагнитные муфты могут быть использованы и в системах непрерывного регулирования. В этом случае их характеризует ПФ инерционного звена с постоянной времени 0,03...0,25с (для порошковых) и 0,11...0,45с (для асинхронных муфт).

#### 4.5. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Устройство, позволяющее изменить направление или расход потока вещества или энергии в соответствии с требованиями ТП, называют *регулирующим органом* (РО).

Работоспособность РО определяется его характеристиками: диапазоном регулирования и рабочей расходной характеристикой.

Отношение максимальной расхода среды  $G_{\max}$  к минимальному  $G_{\min}$  соответствующему перемещению РО из одного крайнего положения  $h_{\min}$  в другое и другое  $h_{\max}$ , называют *диапазоном регулирования*

$$R = G_{\max} / G_{\min} .$$

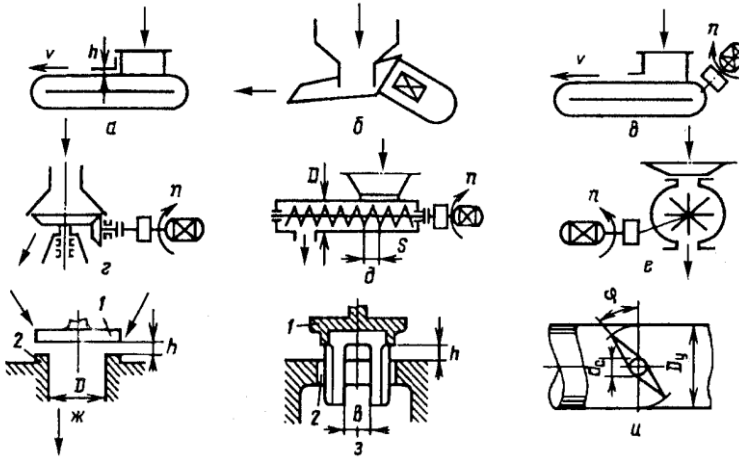
Зависимость расхода среды от положения РО  $h$  называют *рабочей расходной характеристикой*

$$G = f(h) .$$

При разработке, выборе и наладке РО для обеспечения возможности эффективного управления ТП в широком диапазоне нагрузок и при разных режимах следует обеспечить достаточный диапазон регулирования и линейную рабочую характеристику в пределах этого диапазона. Используемые в сельскохозяйственном производстве РО можно разделить на три группы.

**Регулирующие органы объемного типа** (рис. 4.6, а). Они изменяют расход среды за счет изменения ее объема (например, *ленточные питатели-дозаторы* компонентов кормовых смесей). Материал на ленту поступает непосредственно из бункера через воронку в его нижней

части. На фронтальной грани воронки в вертикальных направляющих перемещается заслонка, посредством которой осуществляется регулирование производительности питателя.



**Рис. 4.6. Регулирующие органы:** а – ленточный питатель (объемный); б – вибрационный питатель; в – ленточный питатель (скоростной); з – тарельчатый питатель; д – шнековый питатель; е – секторный питатель; ж – тарельчатый клапан; з – золотниковый клапан; и – поворотная заслонка

Для исключения заклинивания ленты высота щели  $h$  между заслонкой и лентой должна быть не менее  $(2,5...3)d_{max}$ , где  $d_{max}$  – максимально возможный размер частиц материала.

**Регулирующие органы скоростного типа.** Они изменяют производительность РО за счет изменения его частоты вращения. К РО этого типа относят устройства для регулирования частоты вращения вытяжных вентиляторов, систем вентиляции животноводческих помещений, шнековых питателей-дозаторов и т. д.

В связи с большим разнообразием физико-химических свойств дозируемых компонентов кормов, других сыпучих материалов и условий, в которых работают эти РО, известно большое число конструкций их рабочих органов. Эти органы, как правило, состоят из активных элементов, обеспечивающих перемещение дозируемого материала, ограничивающих элементов, формирующих поток, и вспомогательных элементов.

Рациональный выбор рабочего органа и его конструктивное оформление в значительной степени обеспечивают надежность устройства и точность дозирования.

*Вибрационные питатели* (рис. 4.6, б) предназначены для подачи из бункера, не имеющего дна, мелко- и крупнокусковых материалов. Подачу материала регулируют изменением амплитуды выпрямленного напряжения, подводимого к электромагнитам питателя. Электромагниты, жестко связанные с корпусом лотка, заставляют его вибрировать с определенной частотой. Материал вследствие небольшого наклона лотка перемещается к его концу со скоростью, зависящей от амплитуды питающего напряжения. Достоинства вибрационных питателей – отсутствие вращающихся частей, плавное и практически безынерционное регулирование производительности.

*Ленточные питатели* (рис. 4.6, в) предназначены для выдачи сыпучих материалов с различными размерами фракций. Производительность питателя зависит от размеров фракций материала и скорости перемещения ленты  $v$ . Последнюю можно изменять с помощью частоты вращения электропривода или бесступенчатого вариатора, управляемого ИМ.

*Тарельчатые питатели* (рис. 4.6, г) предназначены для подачи из бункеров преимущественно мелкозернистых и мелкокусковых материалов. Тарельчатый питатель представляет собой круглый плоский диск (тарель), устанавливаемый под бункером и вращаемый специальным приводом желательного с возможностью регулирования частоты вращения  $n$ . Между бункером и тарелью устанавливают манжеты и нож, с помощью которых осуществляется регулирование сечения потока материала. Более точное регулирование осуществляют поворотом ножа или изменением частоты вращения тарели. Производительность питателя зависит от изменения физических свойств материала, высыпающегося на тарель.

*Шнековые питатели* (рис. 4.6, д) более всего пригодны для выдачи мелкозернистых и мелкодисперсных материалов.

Производительность шнекового питателя пропорциональна квадрату диаметра рабочего винта  $D$  шагу  $S$  и частоте его вращения  $n$ .

*Секторные питатели* (рис. 4.6, е) предназначены для выдачи мелкозернистых материалов. Основа конструкции секторного питателя – вращающийся барабан, разделенный радиальными перегородками на несколько секторов.

В частном случае (барабанный питатель) сектор может быть и один. Секторный питатель устанавливают под бункером. Материал вы-

дается за счет поочередного заполнения и опорожнения секторов в процессе вращения ротора.

Производительность регулируют, изменяя частоту  $n$  вращения рабочего органа.

Недостатком питателя является зависимость степени заполнения секторов от числа оборотов  $n$  вращения ротора.

**Регулирующие органы дроссельного типа.** Они изменяют расход вещества за счет изменения скорости и площади сечения потока жидкости или газа при прохождении его через дросселирующее устройство, гидравлическое сопротивление которого – переменная величина.

Регулирующие клапаны (рис. 4.6, *ж* и *з*) отличаются формами плунжера 1 и седла 2.

Каждая конструкция характеризуется прежде всего зависимостью площади проходного сечения  $F$  клапана от положения плунжера.

Для тарельчатого клапана, показанного на рисунке 4.6, *ж*, эту характеристику называют конструктивной и рассчитывают по формуле ( $h_{\max} = 0,25D$ )

$$F = \pi Dh,$$

где  $D$  – диаметр отверстия, м.

Для золотникового клапана (рис. 4.6, *з*) с прямоугольным сечением окон

$$F = nbh,$$

где  $n$  – число окон;  $b$  и  $h$  – ширина и высота окна, м.

Поворотные заслонки (рис. 4.6, *и*) круглой или прямоугольной формы предназначены в основном для регулирования расхода газообразных сред при малых перепадах давления на регулирующем органе.

Зависимость площади проходного сечения от угла поворота заслонки имеет вид

$$F = 0,78D_y^2 (1 - \cos \varphi),$$

где  $D_y$  – диаметр условного прохода круглой или равной ей по площади прямо угольной заслонки, численно равный внутреннему диаметру круглой заслонки, м;  $\varphi$  – угол поворота заслонки, изменяющийся от 0 до  $\varphi_{\max}$ .

Работоспособность системы автоматического управления в значительной мере зависит от правильности выбора регулирующего органа. Выбирают конкретный РО по данным справочников или каталогов в соответствии с наибольшим значением пропускной способности.



### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Что представляет собой функционально-целевая структура электрической ветви ГСП? Перечислите уровни деления электрических средств автоматики.

2. Что собой представляют технические средства автоматизации и технического средства информации?

3. Для чего предназначены технические средства безопасности? Каковы их основные составляющие?

4. Опишите основные виды и функции датчиков. Для чего предназначены и как работают оптические и магнитные датчики?

5. Что собой представляют комплексные и интегрированные системы безопасности?

6. Как системы машинного зрения используются для идентификации объекта?

7. Опишите принцип действия устройств для измерения давления и разрежения.

8. Поясните принцип действия устройств для измерения температуры.

9. Каков принцип действия устройств для измерения уровня и расхода?

10. Изложите принцип действия устройств для измерения перемещения и частоты вращения объектов.

11. Какую функцию выполняет автоматический регулятор?

12. Перечислите основные виды автоматических регуляторов.

13. Какую функцию выполняет исполнительный механизм в системах автоматики?

14. Какую функцию выполняет регулирующий орган в системах автоматики?

## 5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

### 5.1. ВЫБОР РЕГУЛЯТОРА И ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

Тип регулятора и закон управления (регулирования) выбирают в зависимости от технологических показателей, свойств ОУ, а также требований к качеству процесса регулирования.

Свойства объекта управления в первом приближении могут быть оценены по отношению времени запаздывания к постоянной времени объекта  $T_{об} : \tau/T_{об}$ . Чем это отношение больше, тем задача автоматизации сложнее, и потому рекомендуют:

- при  $\tau/T_{об} < 0,2$  – позиционный регулятор;
- при  $0,2 \leq \tau/T_{об} \leq 1$  – регулятор непрерывного действия;
- при  $\tau/T_{об} > 1$  – импульсный или цифровой регулятор.

Приведенные рекомендации, однако, не исчерпывающие. Так, позиционные системы регулирования характеризуются автоколебаниями регулируемой величины, и если технология автоматизируемого процесса не допускает автоколебательного режима, то возможно применение регулятора непрерывного действия.

Одна из основных характеристик качества процесса регулирования – *точность*, оцениваемая значением статической ошибки, т. е. остаточным отклонением регулируемой величины от заданного значения по окончании переходного процесса.

В реальных системах статическая ошибка не должна выходить за пределы, допускаемые технологией автоматизируемого процесса.

Большинство остальных показателей качества характеризует работу системы в переходных режимах. Эти показатели могут быть разделены на две группы: определяемые непосредственно по кривой переходного процесса и косвенным показателям.

К первой группе показателей (рис. 5.1, а) относят:

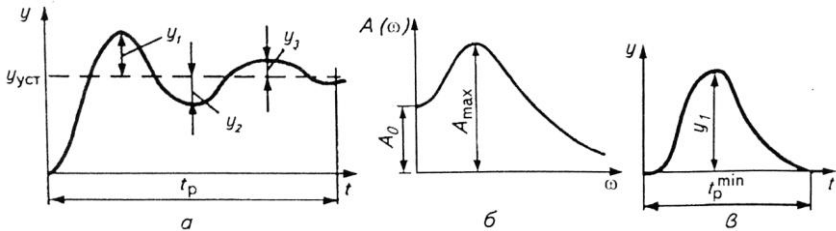
- *динамическое отклонение*  $y_1, y_2, y_3$ , измеряемое в единицах регулируемой величины  $y$  и характеризующее ее отклонение от установившегося (заданного)  $y_{уст}$  значения;

- *время регулирования*  $t_p$ , характеризующее быстродействие системы и охватывающее отрезок времени от момента нанесения возмущения до момента, когда отклонение войдет в заранее заданные мини-

мальные пределы. Время регулирования зависит от свойств объекта, закона и параметров настройки регулятора. Минимальные значения  $t_p$  имеют аperiodические переходные процессы регулирования;

- *степень затухания  $\psi$* , характеризующую интенсивность затухания колебательного переходного процесса. Степень затухания измеряют в долях (или в процентах)

$$\psi = (y_1 - y_3) / y_1.$$



**Рис. 5.1. Переходный процесс в автоматической системе регулирования:**  
 а – периодический; б – амплитудно-частотная характеристика; в – аperiodический

Изменяя параметры настройки регулятора, можно получить степень затухания от нуля, когда система находится на границе устойчивости, до  $\psi = 1$  для аperiodических процессов. Обычно приемлемые значения степени затухания 0,75...0,9.

Изменяя параметры настройки автоматического регулятора, при любом законе регулирования можно ПОЛУЧИТЬ различное перерегулирование: от нуля при аperiodическом переходном процессе до 100 % при установившемся незатухающем колебательном процессе.

В практике автоматизации наибольшее распространение получили аperiodические переходные процессы и процессы с 20%-ным перерегулированием.

Ко второй группе показателей относят:

- *степень устойчивости  $\alpha$*  определяется расстоянием ближайшего корня характеристического уравнения замкнутой системы от мнимой оси;

- *степень колебательности  $m$*  определяется по расположению корней характеристического уравнения относительно мнимой оси. Степень колебательности  $m$  связана со степенью затухания  $\psi$  соотношением

$$\psi = 1 - e^{-2\pi m};$$

• *показатель колебательности*  $M$  определяют по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы (рис. 5.1. б):

$$M = A_{\max} / A.$$

Чем дальше система от границы устойчивости, тем меньше  $A_{\max}$  и  $M$ . Обычно значения  $M$  составляют 1,2...2,4.

Недостаток перечисленных показателей качества в том, что каждый из них характеризует только один признак переходного процесса.

Общую характеристику переходного процесса дают интегральные оценки (критерии) качества, учитывающие одновременно и максимальные отклонения регулируемой величины, и время регулирования.

*Линейная интегральная оценка* описывается уравнением

$$J_1 = \int_0^{\infty} \Delta y(t) dt, \text{ где } \Delta y(t) \text{ – разность между текущим и заданным значениями регулируемой величины.}$$

Линейная интегральная оценка может быть использована для характеристики только аperiodических процессов регулирования. Для колебательных переходных процессов, когда положительные полуволны чередуются с отрицательными, алгебраическая сумма площадей не может характеризовать качество работы системы управления.

*Аperiodический процесс* применяют в тех случаях, когда не допускается перерегулирование, требуется минимальное время регулирования, а динамическое отклонение  $y_1$ , может быть довольно большим (рис. 5.1, в).

*Квадратичную интегральную оценку* проводят по уравнению

$$J_2 = \int_0^{\infty} \Delta y^2(t) dt \text{ и используют для характеристики колебательных процессов, поскольку изменение знака отклонения регулируемой величины } \Delta y \text{ не сказывается на оценке.}$$

В зависимости от особенностей автоматизируемого процесса и действующих возмущений наилучшими могут быть признаны переходные процессы, характеризуемые различными показателями или критериями качества, а также их сочетаниями (например, заданная степень затухания  $\psi$  при минимуме интегрального квадратичного критерия  $J_2$ ).

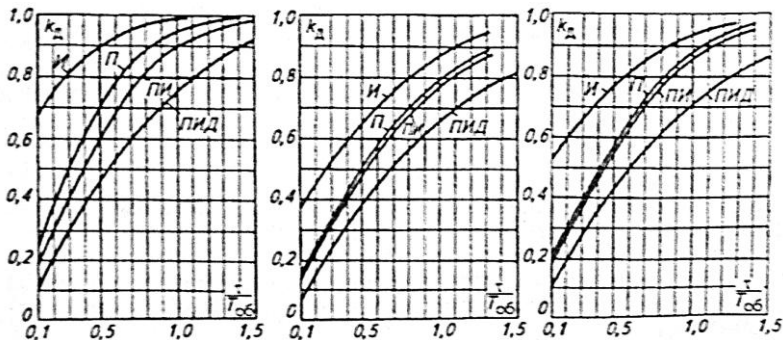
Все рассмотренные ранее показатели и критерии качества рассчитаны на оценку качества переходного процесса при отработке детерминированных воздействий (ступенчатой формы и др.). Между тем реальные системы обрабатывают возмущения случайного характера.

Если входной сигнал случайно изменяющийся  $x(t)$ , то и выходной сигнал  $y(t)$  тоже случайный.

Качество работы таких систем оценивают значением среднеквадратичного отклонения или дисперсией выходного сигнала.

## 5.2. ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОДНОКОНТУРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В задачи синтеза автоматических систем регулирования входят выбор закона регулирования и определение параметров настройки регулятора, обеспечивающих заданное или оптимальное качество переходных процессов.



**Рис. 5.2. Номограммы для выбора закона регулирования:**

а – переходный процесс без перерегулирования; б – с 20 %-ным перерегулированием; в – с минимумом  $J_2$

Выбор закона регулирования основывается на требованиях к качеству стабилизации параметра, динамических характеристиках объекта регулирования и характеристиках возмущающих воздействий. При этом значение возмущающих воздействий оценивают по входному регулирующему воздействию  $x$ , обеспечивающему их компенсацию.

При выборе закона регулирования обычно используют номограммы (рис. 5.2), составленные для трех наиболее распространенных типов переходных процессов; без перерегулирования с 20%-ным перерегулированием и с минимумом  $J_2$ .

На номограммах представлены И-, П-, ПИ- и ПИД-регуляторы. С увеличением инерционности объекта, характеризуемой отношением

$\tau/T_{об}$ , и изменением коэффициента усиления регулятора  $K_D$  должны быть использованы более сложные законы регулирования [4].

Выбор закона регулирования завершается проверкой обеспечения регулятором допустимых времени и ошибки регулирования.

### 5.3. ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Если объект регулирования имеет неудовлетворительные динамические характеристики, то требуется усложнение закона регулирования или переход от одноконтурной системы к многоконтурной, включающей в себя дополнительные (корректирующие) импульсы по возмущениям или вспомогательным выходным координатам.

В зависимости от корректирующего импульса многоконтурные автоматические системы регулирования (СР) делят на комбинированные, каскадные, с выводом производной от промежуточной регулируемой величины и взаимосвязанные системы.

**Синтез комбинированных автоматических СР.** Если на объект регулирования действует одно или несколько возмущающих воздействий и каналы передачи этих воздействий имеют меньшую инерционность, чем каналы передачи регулирующего воздействия, то обычная одноканальная СР, действующая по отклонению регулируемой величины, оказывается неэффективной и требуемое качество регулирования может быть обеспечено работой комбинированной, т. е. действующей по отклонению и по возмущению, СР.

**Синтез каскадных автоматических СР.** Этот тип многоконтурных СР рекомендуется в том случае, если основной вид возмущения – поступающее по каналу регулирующее воздействие. При этом сам объект, характеризуемый значительной инерционностью, должен иметь промежуточную (вспомогательную) регулируемую величину менее инерционную, чем основная.

**Синтез автоматических СР с выводом производной от промежуточной регулируемой величины  $y_1$ .** Такие системы – вариант каскадной СР и рекомендуются для случая, когда регулируемый параметр распределен по пространственной координате (например, по длине объекта), а регулирующее воздействие подается на его вход.

В результате воздействия дополнительного импульса  $dy_1/dt$  процесс компенсации возмущений начнется раньше, чем произойдет существенное отклонение  $y$ .

Однако в установившемся режиме дополнительное воздействие должно сниматься, иначе регулятор будет поддерживать  $y$  с ошибкой. Именно поэтому дополнительное воздействие формируется с помощью дифференциала  $dy/dt$ .

**Синтез многосвязных автоматических СР.** Этот тип многоконтурных СР рекомендуется в том случае, если ОУ характеризуется системой взаимных связей между выходными параметрами (одно регулирующее или возмущающее воздействие оказывает влияние на несколько выходных параметров).

Динамику многосвязных объектов описывают системой дифференциальных уравнений, а в преобразованном по Лапласу виде – матрицей ПФ.

Если рабочие частоты двух контуров регулирования различны, то взаимное влияние контуров незначительно и их можно рассчитывать независимо.

Если инерционность прямых и перекрестных каналов примерно одинакова, то параметры рассчитывают по эквивалентной ПФ или вводят в структурную схему компенсирующие связи, т. е. рассчитывают систему связанного регулирования.

Система связанного регулирования обеспечивает принцип автономности – взаимную независимость выходных координат при работе замкнутых СР. Автономность достигается организацией перекрестных компенсирующих связей по одному из двух вариантов: в виде прямых и обратных перекрестных компенсирующих связей.

Системы могут быть автономными по отношению к задающим или возмущающим воздействиям, причем оба признака одновременно не реализуются.

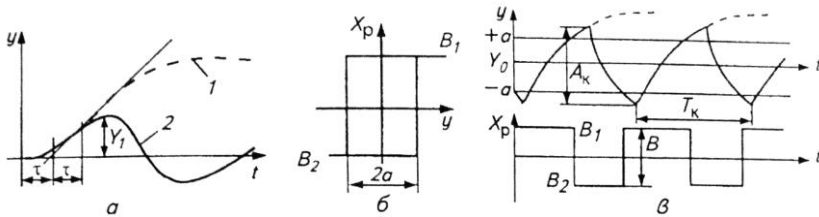
Сложно реализуется система связанного регулирования при числе связей  $n > 2$ , поскольку число перекрестных компенсирующих связей увеличивается до  $n(n-1)$ .

#### 5.4. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Большинство автоматических систем характеризуется запаздыванием, определяемым свойствами объекта или наличием в СР периодически действующих регуляторов.

Многочастотные объекты, кривая разгона  $I$  которых имеет S-образную форму, характеризуются переходным запаздыванием  $\tau$  (рис. 5.3, а). Чем вредно запаздывание? Переходный процесс (временного

интервала первых  $2\tau$  после выхода СР из равновесия) повторяет кривую разгона, и потому динамическая ошибка  $y_1$  тем больше, чем больше  $\tau$ .



**Рис. 5.3. Переходные процессы в системах регулирования:**  
 а – с запаздыванием (1 – кривая разгона; 2 – переходный процесс);  
 б – статическая характеристика; в – установившиеся колебания системы  
 двухпозиционного регулирования

Классический способ улучшения качества регулирования – применение регуляторов, обеспечивающих компенсацию чистого запаздывания.

Существенное улучшение качества регулирования при особо неблагоприятных динамических характеристиках объекта ( $\tau/T_{об} > 3$ ) обеспечивает пропорционально-дифференциальный регулятор.

Если возмущение, изменяющее динамику объекта, можно измерить, то лучший прием, обеспечивающий высокое качество регулирования, – параметрическая компенсация, т. е. автоматическое изменение параметров настройки регулятора. Соответствующая операция выполняется по команде вычислительного устройства, обрабатывающего информацию о состоянии объекта в соответствии с заранее разработанным алгоритмом.

## 5.5. СИНТЕЗ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

При синтезе автоматических СР с двухпозиционным регулятором следует учитывать, что даже в отсутствие возмущений такие системы находятся в режиме установившихся колебаний. Поэтому выбранные параметры регулятора – зона неоднозначности  $2a$  и величина регулирующего воздействия  $B$  (рис. 5.3, б) – должны обеспечить минимальную амплитуду  $A_k$  и максимальный период  $T_k$  автоколебаний, а среднее значение регулируемой величины  $y_{cp}$  возможно более близкое к заданному значению  $y_0$  (рис. 5.3, в).



Уменьшение зоны неоднозначности  $2a$  снижает не только амплитуду  $A_k$ , но и период автоколебаний  $T_k$ . При этом если первое обстоятельство должно, несомненно, приветствоваться, поскольку улучшает эксплуатационные характеристики автоматизируемого процесса, то второе сокращает срок службы релейных элементов и электрических нагревателей.

При малых  $2a$  амплитуда колебаний  $u$  пропорциональна  $B$ , а среднее значение регулируемой величины  $y_{cp}$  – действующим в системе возмущениям. Коэффициент пропорциональности определяется инерционностью объекта, характеризуемой отношением  $\tau/T_{об}$ .

Существует большое число способов улучшения качества двухпозиционного регулирования.

Самые простые из них – это регулирование неполным притоком и (или) оттоком энергии. По сути своего влияния эти способы аналогичны уменьшению регулирующего воздействия, но их гораздо проще осуществить. Аналогичный эффект достигается и при включении ступенчатого импульсного прерывателя в выходные цепи регулятора (релейно-импульсное регулирование).

## 5.6. ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Цифровые автоматические системы (ЦАС) реализуются на базе миниЭВМ или микропроцессоров. По сравнению с традиционными (аналоговыми) они обеспечивают квантование регулируемой величины и регулирующего воздействия, причем как по уровню, так и по времени.

Квантование по уровню необходимо из-за ограниченной разрядности входных и выходных преобразователей ЦАС. Квантование по времени – из-за ограниченного быстродействия ЭВМ. В результате управляющие воздействия выдаются через определенные промежутки времени (интервалы дискретности).

Преимущества ЦАС: стабильность характеристик и отсутствие дрейфа; высокая точность и разрешающая способность; возможность реализации очень сложных алгоритмов (за счет программного обеспечения); возможность управления медленно меняющимися процессами; экономичность за счет возможности иметь до 50...100 контуров регулирования; помехоустойчивость и др.

**Цифровые автоматические системы на базе миниЭВМ** (рис. 5.4, а). На базе мини-ЭВМ создаются централизованные ЦАС, в которых используются разнообразные периферийные устройства связи с ОУ и оператором.

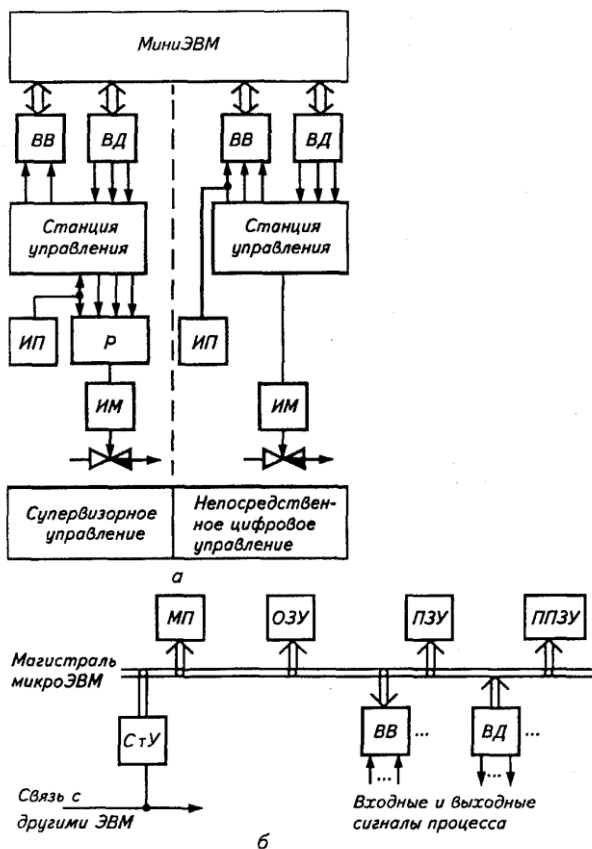


Рис. 5.4. Функциональные схемы цифровой (а) и микропроцессорной (б) автоматических систем

Входные (ВВ), например аналого-цифровые, и выходные (ВД), например цифро-аналоговые, преобразователи позволяют вводить в ЭВМ аналоговую и цифровую (дискретную) информацию, а также выработать регулирующие воздействия на аналоговые исполнительные механизмы (ИМ) и регуляторы (Р).

Станция управления (СтУ) служит для сопряжения средств вычислительной техники с исполнительным механизмом (ИМ) и регулятором (Р). ЭВМ решает большое число задач управления. Это требует разра-

ботки сложных операционных систем реального времени, а также специальных языков программирования.

**Микропроцессорные ЦАС.** По сравнению с ЦАС на миниЭВМ они надежнее и дешевле за счет функциональной и пространственной децентрализации. Первое обстоятельство увеличивает надежность путем резервирования отдельных элементов ЦАС, второе – сокращает длину коммуникаций за счет приближения устройства управления к ТП.

Микропроцессорная ЦАС (МП-регулятор) представляет собой микроЭВМ со всеми необходимыми для выполнения функций регулирования устройствами (рис. 5.4, б).

Все модули регулятора объединены общей магистралью, и их число можно изменять. При этом отдельные модули сами могут содержать микропроцессор (МП). Программы распределяют в памяти так, чтобы при исчезновении питания не потерять постоянную информацию, в том числе и операционную систему. В простейшем случае операционной системы может и не быть, и тогда ЭВМ, решив одну задачу, вновь переключается на ее начало.

Перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ) хранит структурную схему и параметры настройки ЦАС. Эти данные определяют, какие программы постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и в какой последовательности выполняются.

Содержимое оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) – информация, меняющаяся в процессе работы регулятора.

Для ВВ и ВД используют преобразователи с 12-разрядной разрешающей способностью. Через СтУ осуществляют сопряжение ЦАС с внешними устройствами. Данные передают последовательным или параллельным кодом. Число контуров для МП ЦАС – до 16.

По условиям работы человек должен иметь возможность вмешиваться в работу ЦАС. Кроме того, управляющие сигналы ЦАС (они квантованы по уровню и времени) должны быть преобразованы в аналоговые. Эти задачи решают с помощью СтУ. Кроме того, СтУ запоминает задающие и регулирующие воздействия в промежутках времени между получением новых значений от ПАС, индицирует регулируемую переменную, задающее и регулирующие воздействия, обеспечивает безударный переход из «автоматического» режима в «дистанционный» и обратно, а также и другие функции.

На базе микроЭВМ можно строить децентрализованные ЦАС, которые дешевле и надежнее рассмотренных выше.

## 5.7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ НЕПОЛНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Все рассмотренные выше системы функционировали в условиях, когда статические и динамические характеристики ОУ, а также и характеристики возмущающих воздействий известны. Такие системы относятся к системам *с полной начальной (априорной) информацией* об объекте управления.

Возможны, однако, случаи, когда характеристики ОУ и действующих на него возмущений неизвестны или изменяются с течением времени непредвиденным образом. Системы управления такими объектами относятся к системам *с неполной начальной информацией об ОУ*. Эту недостающую информацию приходится получать в процессе работы системы.

Системы, в которых способ функционирования автоматически изменяется для улучшения управления объектом, называют *адаптивными (самоприспосабливающимися)*. Адаптация такой системы к изменившимся условиям работы осуществляется путем изменения параметров или изменения параметров и структуры. Первую систему называют *самонастраивающейся*, а вторую – *самоорганизующейся*.

Если по мере накопления опыта работы системы изменяются параметры, структура и алгоритм управления, то систему называют *самообучающейся*.

Один из видов самонастраивающихся систем – системы *экстремального управления (СЭУ)*.

В отличие от рассмотренных ранее систем автоматической стабилизации, в которых заданные значения регулируемой величины были неизменными или изменяющимися по определенной программе, СЭУ дополнительно ведут автоматический поиск требуемого оптимального значения регулируемой величины или некоторого показателя качества при изменяющихся внешних условиях работы объекта.

В общем случае задача СЭУ – поддержание максимального (минимального) значения некоторого показателя, существенно изменяющегося в зависимости от условий работы объекта.

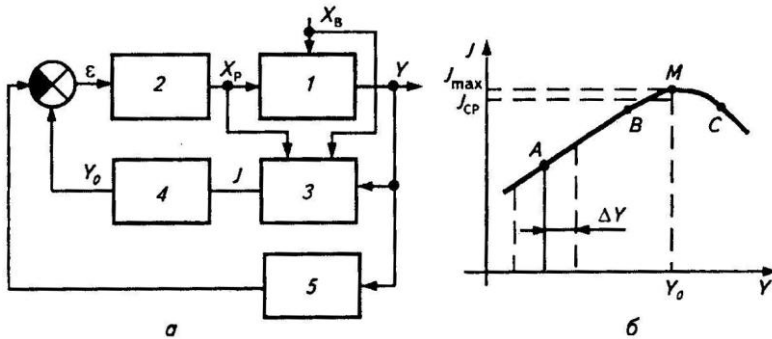
Экстремальное регулирование применяют, например, для поддержания оптимальной скорости движения машинно-тракторного агрегата, обеспечивающей минимальный расход топлива на единицу обработанной площади. Естественно, структурная схема СЭУ должна включать в себя устройство автоматического поиска экстремума.

По способу поиска СЭУ подразделяют на системы с автоколебательным и принудительным поиском. В первом случае поисковые коле-

бания генерируются самой системой, во втором используется автономный источник колебаний.

СЭУ можно разделить также на одно- и многомерные в зависимости от того, сколько переменных входит в экстремальную функцию качества. В одномерных системах экстремум достигается за счет изменения одной независимой переменной. Структурная схема такой СЭУ приведена на рисунке 5.5, а. Рассмотрим возможные способы функционирования такого устройства для простейшего случая зависимости экстремума характеристики  $J$  от одной переменной  $y$ .

1. *Способ последовательных шагов* (рис. 5.5, б) заключается в организации принудительного изменения величины  $y$  на некоторое значение  $\Delta y$  относительно начальной точки  $A$ . Новые значения  $J$  сравнивают с тем, которое было, и если эта разность положительная, то  $y$  получает новое приращение  $\Delta y$  того же знака. Если новое значение  $J$  окажется меньше старого, то знак  $\Delta y$  меняют на обратный и опыт повторяют. В результате система выходит на экстремум  $J$  и колеблется вокруг него в пределах, зависящих от значения  $\Delta y$ .



**Рис. 5.5. Схема экстремальной автоматической СУ (а) и график поиска экстремума (б):**

- 1 – объект управления; 2 – управляющий элемент; 3 – устройство автоматического поиска экстремума; 4 – исполнительный механизм;
- 5 – измерительное устройство;  $x_b$  – возмущающее воздействие;
- $x_p$  – регулирующее воздействие;  $\epsilon$  – ошибка управления

2. *Способ производной* основан на использовании знака производной  $dJ/dy$  при принудительном (пробном) изменении  $y$ . Если находят

максимум  $J$ . то изменение знака с плюса на минус должно иметь следствием изменение знака  $\Delta u$ .

3. *Способ запоминания экстремума* характеризуется тем, что система все время работает на увеличение (уменьшение)  $J$  и как только это условие будет выполнено, соответствующий максимум (минимум)  $J$  запоминается, и далее система реагирует на отклонение  $J$  от этого нового значения.

4. *Способ наложения гармонических колебаний* заключается в наложении на медленно меняющуюся входную величину гармонических колебаний, в результате чего фаза выходных колебаний при прохождении точки экстремума будет меняться на  $180^\circ$ . Выделяя эти колебания полосовым фильтром и используя фазовый дискриминатор, можно держать систему вблизи экстремума.

Очевидно, что в каждом из рассмотренных способов система не просто останавливается на экстремуме  $J$ , а совершает вокруг него установившиеся автоколебания, частота и амплитуда которых должны быть такими, чтобы качество ТП не страдало. Рабочая точка регулятора станет перемещаться по дуге  $BC$ , и среднее значение  $J_{cp}$  будет отличаться от максимального  $J_{max}$  на величину  $J_{max} - J_{cp}$ , называемую *потерей на поиск*. Другой показатель – амплитуда колебаний переменной  $u$  около значения  $u_0$ , соответствующего  $J_{max}$ . Эта амплитуда тем больше, чем выше кривая экстремума.

Еще более совершенны самоорганизующиеся и самообучающиеся автоматические СУ [4].

В *самоорганизующихся* СУ происходит автоматическое (непрерывное или периодическое) изменение структуры СУ по команде вычислительного устройства, обеспечивающего экстремум заранее заложенного в систему критерия качества.

В *самообучающихся* СУ структуру и алгоритмы управления постоянно совершенствуют, выбирая те из них, которые лучшим образом обеспечивают выполнение поставленной задачи.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Какими показателями оценивают свойство объекта и качество управления?
2. Назовите критерии качества регулирования.
3. Поясните методы синтеза одноконтурных и многоконтурных автоматических СУ.

4. Как составляют структурные схемы автоматических СР объектов с запаздыванием и нестационарных объектов?
5. Как осуществляется синтез систем позиционного регулирования?
6. Расскажите о цифровых СР.
7. Каковы преимущества цифровых автоматических систем?
8. Какие системы используют для управления при неполной начальной информации?
9. Опишите особенности, задачи и способы функционирования систем экстремального управления.
10. Каковы преимущества самоорганизующихся и самообучающихся СУ?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня вновь происходит техническая революция, выражающаяся развитием комплексно-автоматизированного производства, суть которого состоит в широком внедрении автоматических рабочих машин и их систем. Изделия изготавливаются системой автоматического управления, а человеку остаются только функции контроля, наблюдения, регулирования и программирования процесса производства (внецикловые функции). Новые машины и аппараты облегчают и заменяют физический труд человека, колоссально увеличивают силу его рук, неизмеримо повышают остроту его органов чувств. Однако до недавнего времени почти все, даже наиболее совершенные, механизмы и приборы предназначались для выполнения весьма разнообразных, но только исполнительных функций.

Современный уровень науки позволяет ученым и инженерам ставить и разрешать задачи создания новых устройств, которые освобождают человека от необходимости следить за производственным процессом и заменяют оператора, диспетчера. Появился новый класс машин – управляющие машины. Создание управляющих машин дает возможность перейти от автоматизации отдельных станков и агрегатов к комплексной автоматизации конвейеров, цехов, целых заводов.

Автоматизация технологических процессов обеспечивает сокращение доли тяжелого и малоквалифицированного труда, что ведет к повышению его производительности и неуклонному экономическому росту предприятий. Знания систем автоматики и телемеханики, а также систем автоматического управления технологическим процессом позволяют управлять производством в оптимальных режимах и значительно экономят затраты труда на единицу продукции.

В настоящем издании авторы постарались привести сведения, позволяющие студентам приобрести теоретические знания в области автоматики, а также узнать практические методы анализа и коррекции систем автоматического регулирования (САУ), технологические основы и технические средства автоматизации производственных процессов.

Авторы надеются, что данное пособие позволило студентам ознакомиться с основными понятиями автоматики, оценить технико-экономическую эффективность автоматизации технологических процессов, изучить классификацию автоматических систем управления, технические и конструктивные особенности средств автоматики. Все это поможет будущим специалистам глубже понять изучаемую дисциплину и в дальнейшем применять полученные знания в разработке решений для автоматизации технологических процессов в сфере сельского хозяйства, машиностроения, транспорта и других технических и технологических областях.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. – М.: Колос, 2004.
2. Бохан, Н. И. Средства автоматики и телемеханики / Н. И. Бохан, И. Ф. Бородин, Ю. В. Дробышев. – М.: Агропромиздат, 1992.
3. Загинайлов, В. И. Основы автоматики / В. И. Загинайлов, Л. Н. Шеповалова. – М.: Колос, 2001.
4. Литвиненко, В. В. Автомобильные датчики, реле и переключатели: краткий справочник / В. В. Литвиненко, А. П. Майструк. – М.: ЗАО «КЖИ За рулем», 2004.
5. Шавров, А. И. Автоматика / А. И. Шавров, А. П. Коломиец. – М.: Колос, 2000.
6. Шичков, Л. П. Электрооборудование и средства автоматизации сельскохозяйственной техники / Л. П. Шичков, А. П. Коломиец. – М.: Колос, 1995 г.
7. Энциклопедия. Серия «Машиностроение». Сельскохозяйственные машины и оборудование / под ред. И. П. Ксеновича. – М.: Машиностроение, 1998.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Виды и функции автоматизации .....	6
1.2. Структурные и функциональные схемы и классификация автоматических систем управления .....	9
1.3. Системы автоматического управления технологических процессов .....	15
1.4. Техничко-экономические показатели эффективности автоматизации технологических процессов .....	20
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	25
<b>2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>26</b>
2.1. Операции и технологические процессы сельскохозяйственного производства .....	26
2.2. Классификация и структура систем управления технологическими процессами .....	28
2.3. Особенности автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства .....	31
2.4. Типовые технические решения автоматизации технологических процессов .....	33
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	36
<b>3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>37</b>
3.1. Математическое описание процессов автоматических систем управления .....	37
3.2. Методы линеаризации математической модели установившегося и переходного режимов .....	38
3.3. Аналитический метод построения математической модели ....	40
3.4. Экспериментальные методы построения математической модели .....	41
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	46

<b>4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ</b> .....	47
4.1. Общие сведения о приборах и средствах автоматики .....	47
4.2. Описание технических средств систем автоматического управления.....	49
4.3. Основные типы автоматических регуляторов систем автоматического управления .....	70
4.4. Исполнительные механизмы систем автоматического управления.....	79
4.5. Регулирующие органы систем автоматического управления ....	85
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	89
<b>5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ</b> .....	90
5.1. Выбор регулятора и закона управления .....	90
5.2. Выбор закона регулирования одноконтурных автоматических систем регулирования .....	93
5.3. Выбор закона регулирования многоконтурных автоматических систем регулирования .....	94
5.4. Описание систем регулирования объектов с запаздыванием и нестационарных объектов.....	95
5.5. Синтез систем позиционного регулирования .....	96
5.6. Цифровые автоматические системы.....	97
5.7. Автоматические системы управления при неполной начальной информации.....	100
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	102
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	104
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	105

Учебное издание

*БАГНЮК Виталий Викторович  
РОТТ Аркадий Рейнгольдович*

# АВТОМАТИКА

*Учебное пособие*

Редактор Л. С. Емельянова  
Компьютерный набор и верстка В. В. Багнюк, Д. Н. Симонов  
Дизайн обложки Д. Н. Симонов

Марийский государственный технический университет  
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3