

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве пособия для студентов
учреждений высшего образования по специальностям:
1-74 06 01 «Техническое обеспечение процессов
сельскохозяйственного производства»,
1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной
техники»*

Минск
БГАТУ
2024

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
А18

Составители:

кандидат технических наук, доцент, декан *В. Б. Ловкис*,
начальник учебно-методического отдела *В. В. Маркевич*,
старший преподаватель *В. В. Носко*,
старший преподаватель *Д. С. Пращеник*

Рецензенты:

кафедра лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного
производства учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет»
(кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой *С. П. Мохов*);
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора
РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

А18 Автоматизация технологических операций : пособие / сост. :
В. Б. Ловкис [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2024. – 164 с.
ISBN 978-985-25-0244-3.

Освещены вопросы теории автоматического управления, средств автоматизации и автоматизации технологических процессов дисциплины «Автоматизация технологических операций». Рассмотрены вопросы практического применения различных автоматических устройств и систем в сельскохозяйственном производстве.

Для студентов, магистрантов, аспирантов инженерного профиля.

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-25-0244-3

© БГАТУ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Словарь основных понятий	5
1. Введение. Основные понятия автоматике	7
1.1. Краткий исторический очерк развития автоматике	7
1.2. Особенности автоматизации сельскохозяйственного производства	8
1.3. Основные понятия автоматике	8
1.4. Схемы систем автоматике	10
1.5. Обобщенная функциональная схема	11
1.6. Обратные связи	13
2. Принципы автоматического регулирования	19
2.1. Принципы построения автоматических систем управления	19
2.2. Классификация систем автоматике	22
3. Автоматические регуляторы, выбор и настройка	32
3.1. Объекты автоматизации и их характеристики	32
3.2. Понятие о законах регулирования	38
3.3. Классификация автоматических регуляторов, их выбор и настройка	40
4. Технические средства автоматике	48
4.1. Понятие технического средства автоматике	48
4.2. Классификация технических средств автоматике	49
4.3. Первичные измерительные преобразователи (датчики)	51
4.4. Механические датчики	54
4.5. Потенциометрические датчики	58
4.6. Тензометрические датчики	60
4.7. Электромагнитные датчики	62
4.8. Датчик Холла	68
4.9. Пьезометрические датчики	71
4.10. Емкостные датчики	74
4.11. Фотоэлектрические датчики	75
4.12. Радиотехнические и ультразвуковые датчики	77
4.13. Датчики температуры	78
4.14. Гидравлические и пневматические датчики	82
4.15. Задающие устройства	87
4.16. Сравнивающие устройства	89
4.17. Усилительные устройства	91

4.18. Исполнительные механизмы	101
4.19. Контроллеры	105
5. Автоматизация технологических операций подготовки почвы, посева, уборки и послеуборочной обработки зерна	109
5.1. Системы автоматического регулирования глубины пахоты и культивации	109
5.2. Автоматическое регулирование глубины заделки семян	113
5.3. Автоматическое регулирование положения режущих аппаратов уборочных машин	115
5.4. Автоматическое вождение мобильных агрегатов	117
5.5. Автоматическое управление скоростными и нагрузочными режимами	123
5.6. Автоматизация процессов сушки, очистки и сортировки зерновой массы	133
5.7. Автоматизация процессов активного вентилирования зерна	137
6. Автоматизация технологических операций в животноводстве и птицеводстве	140
6.1. Автоматизация кормления, поения и взвешивания животных	140
6.2. Автоматизация машинного доения коров	141
6.3. Автоматизация первичной обработки молока	146
6.4. Автоматическое управление микроклиматом в животноводческих помещениях	150
7. Автоматизация технологических операций в сооружениях защищенного грунта	154
7.1. Автоматическое управление микроклиматом в теплицах	154
7.2. Автоматическое поддержание влажности почвы	158
Список литературы	163

Словарь основных понятий

Автоматизация – область науки и техники, связанная с применением технических средств, математических методов, систем контроля и управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, продуктов или информации.

Автоматизация технологических процессов (АТП) – этап комплексной механизации, характеризующийся освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления технологическими процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам.

Автоматизированные системы управления производством (САУ) – человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации и управления в различных сферах, главным образом в организационно-экономической деятельности человека, например, управление хозяйственно-плановой деятельностью отрасли, предприятия, комплекса, территориального региона.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами – человеко-машинная система, предназначенная для контроля режимов работы, сбора и обработки информации о протекании технологических процессов локальных производств.

Возмущающее воздействие – образовавшиеся в результате естественного функционирования технологического процесса однородные потоки вещества или энергии, непосредственно влияющие на состояние управляемой величины.

Инженер по автоматизации – специалист, обладающий компетентностью в области проектирования и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств.

Информационные параметры – физические величины, представляющие собой определенное пространственное распределение последовательных серий импульсов на одной или нескольких параллельных линиях, распределение точек изображения на плоскости и т. д.

Объект автоматизации – устройство или совокупность устройств (и биологических объектов), которые непосредственно осуществляют технологический процесс, нуждающийся в оказании специально организованных воздействий извне для выполнения его алгоритма.

Производственный процесс – совокупность технологических процессов, направленных на создание конечного продукта.

Система автоматизированного управления – комплекс устройств, обеспечивающих изменение ряда координат объекта управления с целью установления желаемого режима работы объекта.

Система автоматического регулирования – совокупность регулятора и объекта управления.

Схема автоматизации – основной технический документ, определяющий функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ АВТОМАТИКИ

1.1. Краткий исторический очерк развития автоматики

Автоматизация технологических процессов – этап комплексной механизации, характеризуемый освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления технологическими процессами (ТП) и передачей этих функций автоматическим устройствам. При автоматизации ТП получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов и информации выполняются автоматически при помощи специальных технических средств и систем управления.

Первые автоматические устройства появились в глубокой древности и остались лишь как эпизоды в истории развития техники. Развитие автоматических устройств началось на рубеже XIII–XIX вв. в эпоху промышленного переворота. Первыми промышленными системами автоматического регулирования этого периода являются поплавковый регулятор уровня воды в котле паровой машины, построенной И. И. Ползуновым в 1765 г., и центробежный регулятор скорости паровой машины Дж. Уатта (1784). Во второй половине XIX в. появились первые теоретические работы по автоматике: работа Д. К. Максвелла «О регуляторах» (1866), работа И. А. Вышнеградского «Об общей теории регуляторов» (1876) и «О регуляторах прямого действия» (1877). В этот период автоматика рассматривалась в рамках прикладной механики. И. А. Вышнеградский впервые обратил внимание на то, что объект и автоматическое устройство необходимо рассматривать как единую динамическую систему. Автоматика как наука сложилась к 40-м гг. XX в. Большой вклад в развитие автоматики внесли ученые А. В. Михайлов, И. Н. Вознесенский, А. А. Воронов, В. С. Кулебакин, Б. И. Петров, А. А. Красовский, Е. П. Попов, А. А. Фельдбаум, Г. В. Щипанов и многие другие. Внедрение средств автоматизации стало возможным только после осуществления комплексной механизации и электрификации сельскохозяйственного производства. Реформирование сельского хозяйства на частную собственность и фермерские хозяйства придает особую роль и значение автоматизации ТП, позволяет выполнять отдельные операции в хозяйстве без непосредственного участия

хозяина. Зарубежный опыт фермеров подтвердил, что при индивидуальном ведении хозяйства весьма важно использование принципиально новых САУ с применением управляющих микроЭВМ.

1.2. Особенности автоматизации сельскохозяйственного производства

При автоматизации сельскохозяйственного производства не всегда применим опыт, приобретенный при решении аналогичных вопросов в промышленности. Объясняется это некоторыми особенностями сельского хозяйства, основные среди которых заключаются в следующем.

Во-первых, характер производства на селе – циклический, связанный с естественными биологическими периодами функционирования и развития животных, птицы, растений. Следовательно, и основные ТП прерывисты, и перестроить их в непрерывные не всегда удастся. А между тем, известно, что производства, непрерывные во времени, автоматизировать легче.

Во-вторых, поскольку основные ТП сельскохозяйственного производства тесно связаны с биологическими, то прервать их даже временно нельзя, так как сбой с естественного ритма приводят не только к недополучению продукции, но и порче живых объектов (животных, птицы, растений), снижению их продуктивности, а иногда и гибели.

В-третьих, как правило, нельзя увеличить выход продукции, уменьшив время и число циклов ТП. Этого можно добиться главным образом за счет улучшения культуры сельскохозяйственного производства.

1.3. Основные понятия автоматизации

Для того чтобы машина могла выполнять необходимые операции в ТП, ей нужно управлять, то есть осуществлять пуск, остановку, изменять режим работы, положение рабочих органов и выполнять другие операции управления и контроля путем воздействия на органы управления машины, механизма. Если управление осуществляется человеком, оно называется ручным, если техническим средством – автоматическим.

Для осуществления автоматического управления техническим процессом создается система, включающая управляемый объект (ОУ) 2 и управляющее устройство (АУУ) 1, или автоматический регулятор (рис. 1.1), состоящий из средств автоматики и телемеханики.

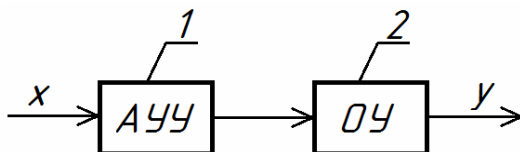


Рис. 1.1. Условное обозначение системы автоматики

Автоматическое управление – это осуществление совокупности воздействий, выбранных из множества возможных (на основании определенной информации) и направленных на поддержание или улучшение функционирования управляемого объекта в соответствии с целью его управления. Оно охватывает вопросы адаптации, самонастройки, автоматического выбора наилучших режимов и т. п.

Автоматическое регулирование – это поддержание постоянной или изменение по заданному закону некоторой выходной величины, характеризующей процесс.

Автоматический контроль – это контроль различных параметров, величин в объекте с целью установить, не вышли ли они за допустимые границы.

Возмущающие и задающие воздействия делятся на внешние и внутренние. Внешнее – это воздействие на автоматическую систему внешней среды или устройств, не являющихся частью этой системы. Внутреннее – это воздействие одной части системы на другую.

Для каждого объекта управления и автоматического управляющего устройства составляются алгоритм функционирования и алгоритм управления.

Алгоритм функционирования – это совокупность предписаний, правил или математических зависимостей, определяющих правильное выполнение технологического процесса в каком-либо устройстве. Он составляется на основании технологических, экономических и других требований без учета динамических искажений.

Алгоритм управления – это совокупность предписаний, определяющих характер управляющих воздействий на объект с целью

осуществления им заданного алгоритма функционирования с учетом динамических свойств системы.

В общем виде элемент автоматики (рис. 1.2, *а*) представляет собой преобразователь, на вход которого подается сигнал (энергия) x , а на выходе возникает сигнал (энергия) y . Если возникает необходимость, чтобы энергия y была больше, чем энергия x на входе, в элемент вводится вспомогательный источник энергии (рис. 1.2, *б*), за счет которого осуществляется усиление сигнала x .

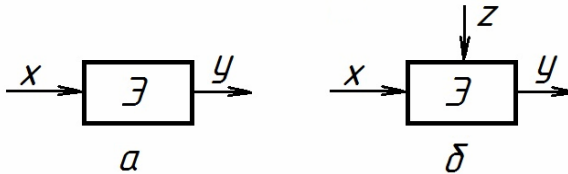


Рис. 1.2. Условное обозначение элементов автоматики

Величины x и y могут быть электрическими (напряжение, ток, сопротивление), механическими (перемещение, скорость и др.), пневматическими и гидравлическими (давление, расход и др.). В САУ используется большое число элементов, отличающихся друг от друга физической природой и конструкцией, принципом действия, схемой включения и т. д. Они имеют универсальное назначение или входят в унифицированные системы, такие как государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА), унифицированная система пневматических и электрических датчиков теплоэнергетических параметров и др. Каждый элемент автоматики выполняет определенную функцию.

1.4. Схемы систем автоматики

Схема – это документ, поясняющий принцип действия и взаимодействие различных элементов, устройств или системы в целом.

Для изображения автоматических систем применяют принципиальные, функциональные и структурные схемы.

Принципиальная схема – позволяет визуально определить наличие, расположение, степень значимости различных элементов автоматической системы.

Функциональная схема (рис. 1.3) – это совокупность функциональных элементов, связанных между собой определенным образом. Функциональные элементы на схемах обозначают прямоугольниками, внутри которых указывается наименование в соответствии с выполняемыми функциями. Связи между функциональными элементами обозначаются стрелками по направлению прохождения сигнала.

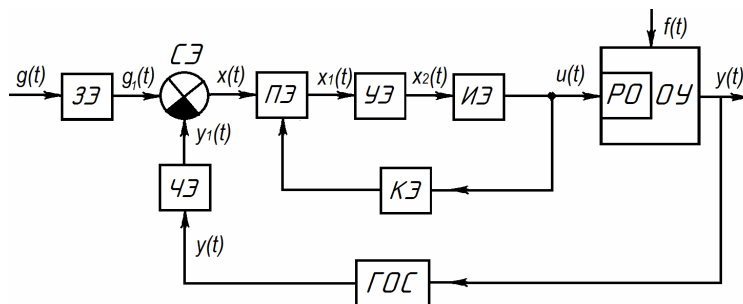


Рис. 1.3. Обобщенная функциональная схема

Структурная схема (математическая модель процесса управления) – это графическое изображение структуры автоматической системы, когда каждой математической операции преобразования сигнала соответствует определенное звено (иногда ее называют алгоритмической структурной схемой). На структурной схеме элементы автоматической системы изображаются в виде прямоугольников, внутри которых записываются соответствующие математические операции, или передаточные функции.

1.5. Обобщенная функциональная схема

Представим наиболее общий случай построения систем автоматического управления, содержащий максимум элементов (рис. 1.3), где ЗЭ – задающий элемент, СЭ – сравнивающий элемент, ЧЭ – измерительный (чувствительный) элемент, ПЭ – преобразующий элемент, УЭ – усилительный элемент, ИЭ – исполнительный элемент, ОУ – объект управления, КЭ – местная обратная связь, ГОС – главная обратная связь.

Чувствительный элемент, или измерительное устройство, измеряет действительное значение *управляемой величины* $y(t)$ и преобразует его в однозначно соответствующую величину $y_1(t)$, удобную для сравнения с задающей величиной $g_1(t)$. Если чувствительный элемент создает электрический или пневматический сигнал, то его называют *датчиком*. В ГСП датчиком называют элемент, который выдает унифицированный сигнал.

Задающий элемент формирует *задающее воздействие* $g(t)$, которое определяет необходимое значение управляемой величины, и преобразует его в однозначно соответствующую величину $g_1(t)$, удобную для сравнения с величиной $y_1(t)$.

В качестве задающего элемента могут использоваться различные кулачковые механизмы, функциональные потенциометры, перфокарты, магнитные пленки, профильные диаграммы и т. п. Иногда задающий элемент конструктивно объединяются в одно целое с измерительным и сравнивающим элементами.

Сравнивающий элемент в наиболее распространенном виде измеряет разность сигналов (ошибку) $x(t) = g_1(t) - y_1(t)$. В сравнивающем элементе может происходить и суммирование сигналов. В качестве сравнивающих элементов могут использоваться потенциометры, механические дифференциалы и сельсинные пары в трансформаторном режиме для сравнения угловых перемещений, устройства на резисторах для сравнения и суммирования электрических напряжений, токов и т. п.

Преобразующий элемент служит для преобразования сигналов в удобный вид и иногда объединяется в одно целое с датчиком или с другим элементом для дальнейшего использования.

Усилительный элемент усиливает сигнал рассогласования $x(t)$ до величины, достаточной для приведения в действие исполнительного элемента. В усилительном элементе происходит увеличение сигнала за счёт получения энергии извне. В системах автоматического управления чаще всего используются электрические (электронные, релейные, электромагнитные, магнитные, полупроводниковые и др.), гидравлические и пневматические усилители. Последние имеют высокие коэффициенты усиления по мощности и выполняют одновременно роль исполнительных элементов (серводвигателей, сервомеханизмов).

Исполнительный элемент вырабатывает и подает на регулирующий орган объекта управления управляющее воздействие $u(t)$. По виду используемой энергии исполнительные элементы разделяют

на электрические (электродвигатели постоянного и переменного тока, однооборотные электрические исполнительные механизмы и др.), гидравлические и пневматические (серводвигатели, характеризующиеся большими усилиями, быстродействием и высокой точностью).

Объекты управления – это различные технические устройства, энергетические и силовые установки, транспортные средства, отдельные механизмы устройств и т. д.

Корректирующий элемент, или местная обратная связь – это специальные устройства, вводимые в систему для улучшения качества управления.

Главная обратная связь – это связь между выходом системы и входом, образующая замкнутый контур управления.

На объект управления кроме управляющих входных воздействий $u(t)$ влияют и различные внешние возмущающие воздействия $f(t)$, или возмущения (см. рис. 1.3), вызывающие изменения управляемой, или регулируемой, величины $y(t)$ (выходная величина).

Изменения во времени входных воздействий и выходных величин характеризуют состояние объекта. Для борьбы с возмущениями объект снабжается регулирующим органом (РО), воздействуя на который вручную или автоматически, можно изменять управляемую величину, компенсируя нежелательные изменения, вызванные влиянием возмущений.

Следовательно, основная задача автоматического управления заключается в формировании такого закона изменения управляющих входных воздействий $u(t)$, при котором желаемое поведение объекта достигается независимо от изменения поступающих на него возмущений $f(t)$.

Основная же задача регулирования состоит в том, чтобы одну или несколько регулируемых величин $y(t)$ сделать равными задающим (эталонным) воздействиям $g(t)$, т. е. $y(t) = g(t)$ во все моменты времени работы системы с заданной точностью.

1.6. Обратные связи

Обратная связь образуется, когда выходной сигнал или его часть подается на вход элемента или системы. По конструктивному исполнению связи могут быть механическими, электрическими, пневматическими, гидравлическими и т. д.

По расположению в структурной схеме САУ обратные связи подразделяются на внешние и внутренние.

Внешние обратные связи охватывают обычно все звенья, а внутренние – одно или ряд звеньев, входящих в систему. *Внутренние обратные связи* позволяют превращать один вид звена в другой, вводить новые звенья, изменять их параметры, не нарушая структурной схемы САУ, и т. д. Обратные связи повышают точность работы системы и улучшают ее динамические свойства.

Исходя из величины обратной связи по отношению к значению прямой цепи, обратные связи подразделяются на единичные ($k_{oc} = 1$) и неединичные. Неединичные связи применяются для уменьшения ошибки в работе замкнутой САУ.

Различают главные и местные (корректирующие) обратные связи.

Главная обратная связь – это связь выхода системы (объекта) с входом системы (объекта).

Местная обратная связь – это связь между выходом элемента и его входом или между выходом и входом нескольких элементов, входящих в систему. Местные связи обычно служат для улучшения основного процесса работы системы, повышения устойчивости и точности, уменьшения ошибок и запаздываний и т. п.

Величина k_{oc} (рис. 1.4), показывающая, какая часть выходного сигнала $y(t)$ снова поступает на вход в виде сигнала обратной связи $y_{oc}(t)$, называется *коэффициентом обратной связи*:

$$k_{oc} = y_{oc} / y.$$

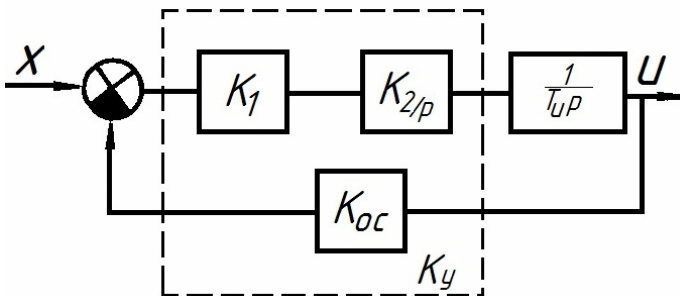


Рис. 1.4. Условное обозначение обратной связи автоматики

Обратные связи делятся на положительные и отрицательные, гибкие и жесткие. Положительной называется такая связь, сигнал которой складывается с входным сигналом:

$$x(t) = g(t) + y_{oc}(t).$$

Отрицательной связь называется, когда ее сигнал вычитается из входного сигнала:

$$x(t) = g(t) - y_{oc}(t).$$

Жесткая обратная связь передает сигналы как в установившихся, так и в переходных режимах. На рис. 1.5, а показана жесткая пневматическая обратная связь.

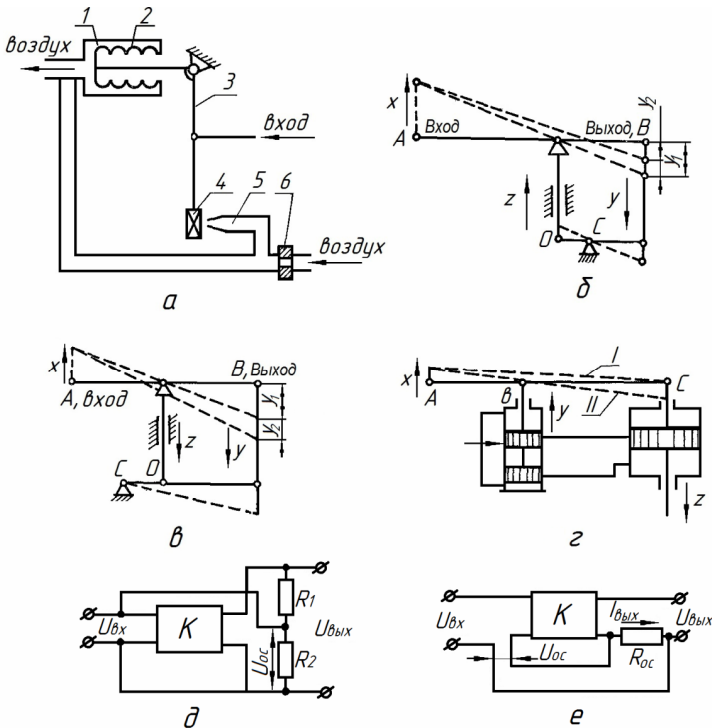


Рис. 1.5. Пример обратных связей автоматики

При перемещении заслонки 4 под воздействием отклонения управляемой (регулируемой) величины скорость истечения воздуха из сопла 5 изменится, что приведет, в свою очередь, к изменению давления воздуха за дроссельным устройством 6 и в сильфонной камере 1. Изменение длины сильфона 2 приведет к перемещению заслонки 4 с помощью рычага 3 в сторону, противоположную воздействию входной величины, и изменению давления за дросселем 6.

На рис. 1.5, б, в показана жесткая механическая обратная связь. Основная цепь воздействий имеет направление от точки A к точке B , положение которой однозначно определяется координатой точки A (жесткая связь). При перемещении точки A вверх на расстояние x точка B сместится за счет основной связи на величину y_1 ; при этом из-за дополнительной связи шарнир 0, который жестко связан с точкой B , перемещается на величину z и будет возвращать точку B вверх на величину y_2 (отрицательное перемещение). Следовательно, результирующее перемещение точки B вниз составит $y = y_1 - y_2$, т. е. имеем отрицательную обратную связь.

На рис. 1.5, в представлена положительная обратная связь, так как результирующее перемещение точки B складывается из перемещений y_1 от действия прямой цепи и перемещения y_2 от действия обратной связи.

На рис. 1.5, г показан гидравлический поршневой серводвигатель с отрицательной жесткой связью, которая осуществляется установкой опоры рычага AC в точке C на штоке поршня (первый момент движения).

Перемещение точки A вызывает движение и перемещает шарнир B вверх. Шарнир C в первый момент неподвижен (положение I), затем при опускании поршня точка C смещается вниз (положение II) и смещает вниз шарнир B (отрицательное перемещение), т. е. имеем отрицательную жесткую связь.

На рис. 1.5, д, е показана жесткая обратная связь по напряжению и току.

Для рис. 1.5, д:

$$y_{oc} = U_{oc} = k_{oc}U_{вых},$$

где

$$k_{oc} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

В качестве элемента обратной связи используется делитель $R_1 - R_2$. Если сигнал обратной связи и выходной сигнал к входу элемента подключены параллельно, то такая связь называется параллельной.

Для жесткой обратной связи по току (рис. 1.5, e) в качестве элемента обратной связи используется резистор R_{oc} . В этом случае $y_{oc} = U_{oc} = k_{oc} U_{вых}$, где $k_{oc} = R_{oc}$, т. е. имеем так называемую последовательную обратную связь, когда U_{oc} , $U_{вых}$ подключены последовательно.

Гибкая обратная связь (изодромная, или упругая связь) действует только в неустановившемся режиме. В первый момент гибкая связь действует как жесткая, а затем ее воздействие постепенно ослабевает и, наконец, исчезает.

Изодромная связь для системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала (отрицательная гибкая обратная связь) показана на рис. 1.6.

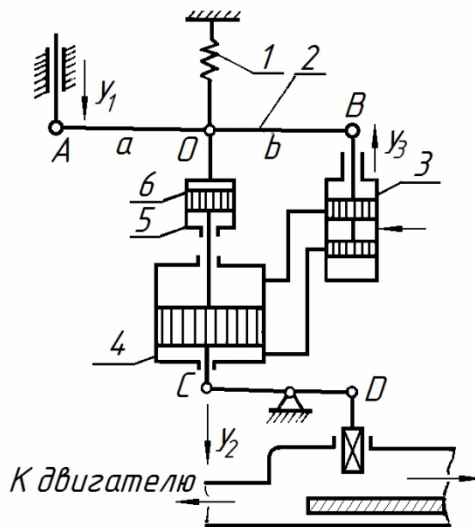


Рис. 1.6. САР частоты вращения коленчатого вала

При этом типе связи с изменением частоты вращения поворот рычага 2 происходит вокруг точки O , перемещая поршни золотника 3 вверх или вниз.

В первый момент смещения поршня гидроцилиндра 4 цилиндр 5 и поршень 6 с калиброванными отверстиями движутся как одно целое, и рычаг AB вначале поворачивается вокруг точки A , осуществляя обратную связь на поршни золотника, растягивая или сжимая пружину 1. В дальнейшем за счет перетекания жидкости в цилиндре 5 пружина 1 возвращает рычаг AB в то положение, которое он занимал до начала движения поршня гидроцилиндра. Поэтому гибкая обратная связь действует только в переходном режиме, причем содействует сохранению астатизма системы.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что представляет собой автоматизация технологических процессов?
2. Назовите основные определения автоматики.
3. Какие существуют схемы автоматики?
4. Приведите обобщенную функциональную схему автоматики.
5. Какие обратные связи используются в автоматике?

2. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

2.1. Принципы построения автоматических систем управления

В основе построения САУ лежат три фундаментальных принципа: разомкнутого управления (регулирования); управления по возмущению и управления по отклонению (по ошибке).

Принцип разомкнутого управления состоит в том, что алгоритмы управления вырабатываются только на основе заданного алгоритма функционирования и не контролируются другими факторами – возмущениями или выходными координатами системы. Принципиальная схема разомкнутого управления показана на рис. 2.1, а.

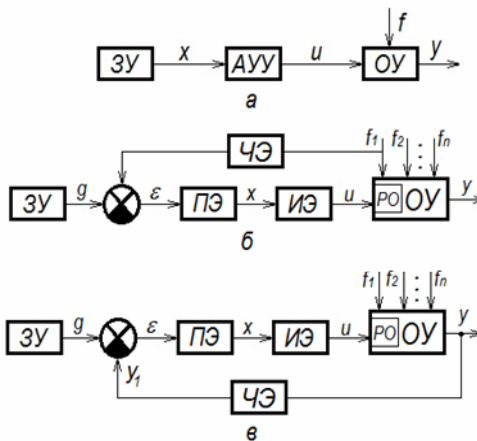


Рис. 2.1. Принципы построения САУ

Схема системы в этом случае имеет вид разомкнутой цепочки, в которой основное воздействие передается от входного (задающего) элемента ЗУ к выходному ОУ (объекту). Поэтому и принцип управления получил название разомкнутого. Основным недостатком его является то, что связь между y и x в разомкнутых системах обеспечивается только конструкцией и подбором физических закономерностей, действующих во всех элементах. Однако используется он очень широко и ввиду своей простоты его не всегда выделяют как один из фундаментальных принципов. На этом принципе построены все системы сигнализации, защиты, контроля, блокировки и т. п.

Ряд устройств, применяемых в автоматике, представляет собой элементы с управлением по разомкнутой цепи (переключатели, реле, логические элементы, некоторые преобразователи, усилители, счетно-решающие элементы, выполняющие операции дифференцирования, интегрирования и т. п.).

Принцип управления по возмущению иногда называют принципом Понселе-Чиколева (по имени французского и русского ученых). Суть его в следующем: для компенсации вредного влияния какого-либо возмущения f необходимо измерить это возмущение и в зависимости от результатов измерения осуществить управляющее воздействие на объект, обеспечивающее изменение управляемой величины по требуемому закону или поддержание ее на заданном уровне.

Для реализации этого принципа в состав САУ должны входить (рис. 2.1, б): чувствительный элемент ЧЭ и исполнительный элемент ИЭ. Между чувствительным и исполнительными элементами могут быть различные промежуточные элементы ПЭ (усилители, преобразователи и т. д.).

Правильно сконструированный регулятор, работающий по этому принципу, обеспечивает независимость (инвариантность) управляемой величины y от воздействия f_i .

Система регулирования давления воздуха в герметизированном отсеке, реализующая этот принцип, приведена на рис. 2.2, а.

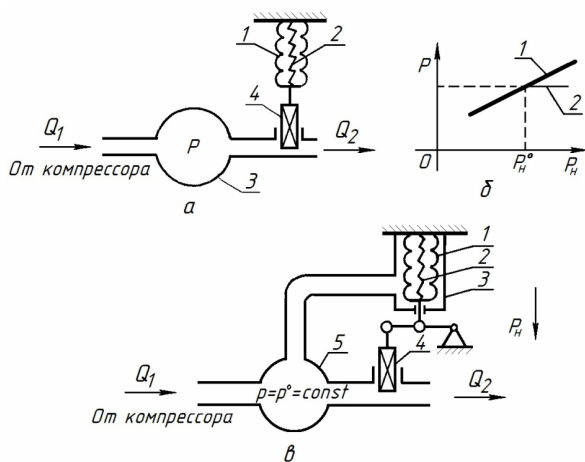


Рис. 2.2. Система регулирования давления воздуха в герметизированном отсеке

Одним из возмущающих воздействий является изменение давления окружающей среды p_n . Зависимость давления p в отсеке 3 от величины p_n (в установившемся режиме) характеризуется кривой 1 (рис. 2.2, б) (все остальные воздействия предполагаются постоянными). Как видно в отсеке без регулятора, требуемое значение давления p^0 имеет место при единственном значении давления внешней среды p_n^0 . Для измерения возмущающего воздействия p_n служит измеритель давления, состоящий из сильфона 1, внутри которого размещена пружина 2. Сильфон представляет собой тонкостенную, герметически запаянную пустотелую металлическую коробку цилиндрической формы с гофрированными стенками, воздух из которой выкачан до технического вакуума. Деформация сильфона в осевом направлении в первом приближении пропорциональна величине давления p_n . Пружина 2 служит для увеличения упругости сильфона. С дном сильфона 1 жестко связана регулирующая заслонка 4 в выходном трубопроводе (промежуточные и исполнительные элементы в регуляторе отсутствуют). Допустим, что положение, изображенное на рис. 2.2, а, соответствует номинальному режиму работы, когда $p = p^0$ и все возмущающие воздействия постоянны. При увеличении давления p_n и отсутствии регулятора это привело бы к уменьшению расхода Q_2 и увеличению давления в отсеке. При наличии регулятора увеличение давления p_n приведет к сжатию сильфона и перемещению регулирующей заслонки 4 вверх. В результате расход на выходе Q_2 , и давление в отсеке сохранит прежнее значение p^0 . Однако если расход воздуха Q_2 будет изменен другими возмущениями, регулятор не обеспечит стабилизацию давления в отсеке.

Принцип управления по отклонению. Как известно, основная задача любой САУ состоит в выполнении равенства $g(t) = y(t)$ с той или иной степенью точности, т. е. при работе САУ возникает ошибка или отклонение $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$. При идеальной работе САУ $\varepsilon(t) = 0$ для всех моментов времени. Для реальных систем при $\varepsilon(t) \neq 0$ задача может заключаться лишь в уменьшении этой ошибки до допустимого значения.

Суть управления по ошибке состоит в том, что тем или иным путем определяется ошибка САУ и в зависимости от величины и знака этой ошибки осуществляется управляющее воздействие,

сводящее ошибку к нулю. Этот принцип был впервые разработан и осуществлен русским механиком И. И. Ползуновым в 1765 г. и английским механиком Дж. Уаттом в 1784 г. В общем случае такие системы должны иметь задающий, чувствительный и сравнивающий элементы (рис. 2.1, в).

Преобразующие элементы регулятора включают в себя устройства для преобразования физической природы сигнала ошибки (модуляторы, демодуляторы и др.) и так называемые корректирующие устройства, осуществляющие функциональные преобразования сигнала ошибки (дифференцирование, интегрирование и др.) и предназначенные для придания системе требуемых свойств.

На рис. 2.2, в показана САУ давления в герметизированном отсеке, реализующая этот принцип. В этой системе чувствительный элемент 1 (сильфон) помещен в камеру 3, давление внутри которой равно давлению p в отсеке 5. Сильфон кинематически связан с регулирующим органом 4. При установившемся состоянии ($Q_1 = Q_2$) давление в отсеке $p = const$ и заслонка 4 занимает вполне определенное положение, так как усилие, действующее на сильфон за счет давления газов в камере 3, уравновешено усилием пружины 2. При увеличении давления в отсеке по каким-либо причинам повышается давление и в камере 3. Сильфон, сжимаясь, перемещает заслонку 4 вверх, увеличивая расход Q_2 на выходе, и давление в отсеке снижается. При уменьшении давления картина повторяется в обратной последовательности. Следовательно, в данной системе чувствительный элемент реагирует только на отклонение давления от установленного значения. В этой системе сравнивающий элемент в явном виде отсутствует. Сигнал ошибки $x(t) = p^0 - p(t)$.

Важным преимуществом САУ по ошибке является отсутствие жестких требований к стабильности характеристик элементов регулятора и объекта, существенным недостатком – склонность к колебаниям, что значительно усложняет расчет таких систем. Поэтому сейчас создаются комбинированные системы, использующие оба эти принципа одновременно.

2.2. Классификация систем автоматики

Существует большое разнообразие САУ, которые классифицируются по различным признакам. По своему назначению различают

автоматические системы сигнализации, защиты, пуска, остановки, контроля, регулирования и управления. Рассмотрим классификацию автоматических систем с точки зрения теории автоматического управления:

1) по характеру алгоритма функционирования или в зависимости от целей управления системы регулирования делятся на стабилизирующие, следящие и программные;

2) по наличию дополнительных источников энергии – прямого и непрямого регулирования;

3) по характеру алгоритма управления – с замкнутой и разомкнутой цепью воздействий;

4) по виду управляющих воздействий на объект – непрерывные, дискретные (релейные и импульсные);

5) по математическому описанию – линейные и нелинейные;

6) по характеру передачи сигналов – одноконтурные и многоконтурные;

7) по количеству регулируемых параметров – одно- и многомерные;

8) по виду зависимости между значением регулируемого параметра и величиной внешнего воздействия на объект – статические и астатические;

9) по самоприспособляемости – без самоприспособления и с самоприспособлением.

Стабилизирующие, следящие и программные автоматические системы. *Стабилизирующие системы.* Автоматическая система управления называется стабилизирующей, если алгоритм ее функционирования содержит предписание поддерживать значение управляемой величины постоянным, т. е. $y(t) = const$.

Пример 1 (рис. 2.3, а). Система автоматического регулирования (САР) уровня воды в котле паровой машины (регулятор И. И. Ползунова).

Управляемым объектом в данной системе является котел 2, в котором необходимо поддерживать уровень воды H (управляемая величина) постоянным, измерительным элементом является поплавок 1, регулирующим органом – заслонка 3, внешним возмущающим воздействием – изменение количества отбора пара из котла Q_2 . Настройка регулятора на заданный уровень H осуществляется изменением длины стержня поплавка.

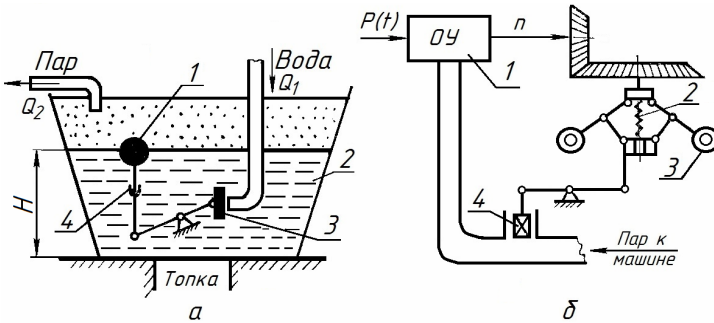


Рис. 2.3. Стабилизирующие системы

Пример 2 (рис. 2.3, б). Система стабилизации частоты вращения вала паровой машины (регулятор Дж. Уатта).

Управляемым объектом в системе является паровая машина 1, частоту вращения n вала которой необходимо поддерживать постоянной, чувствительным элементом – грузы 3 центробежного регулятора, регулирующим органом – заслонка 4, внешним возмущающим воздействием – изменение нагрузки $p(t)$ на валу машины.

Следящие системы предназначены для изменения управляемой величины $y(t)$ по закону, который заранее неизвестен. В таких системах задающее воздействие $g(t)$ представляет случайную функцию времени, которая должна воспроизводить выходную величину $y(t)$.

Пример на рис. 2.4.

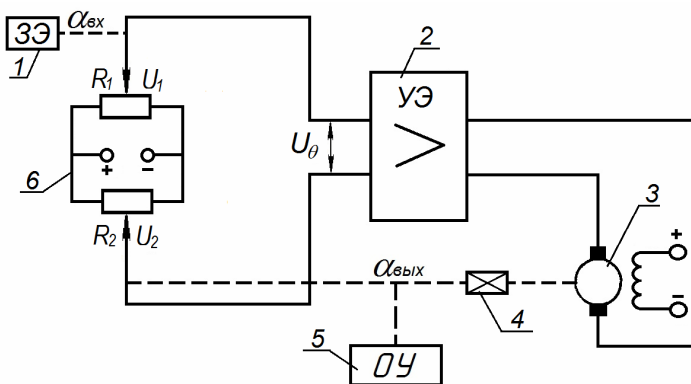


Рис. 2.4. Система согласованного вращения валов

Система предназначена для автоматического управления положением объекта 5 с помощью некоторого задающего устройства 1 (штурвал). Угловое положение $\alpha_{\text{вх}}$ задающего вала преобразуется с помощью потенциометра R_1 в соответствующий потенциал U_1 , а $\alpha_{\text{вых}}$ выходного вала, связанного с объектом 5, потенциометром R_2 в соответствующий потенциал U_2 . Потенциалы U_1 и U_2 сравниваются в устройстве 6. Результат их сравнения называется сигналом ошибки U_0 , т. е. $U_0 = U_1 - U_2$. Сигнал ошибки поступает на вход усилителя 2, к выходу которого подключен исполнительный элемент 3 (электрический двигатель), связанный через редуктор 4 с объектом. При согласованном положении входного и выходного валов обеспечивается равенство $\alpha_{\text{вх}} = \alpha_{\text{вых}}$. При этом условии потенциалы датчиков (потенциометров) R_1 и R_2 будут равны, т. е. $U_1 = U_2$ и сигнал ошибки $U_0 = 0$. Двигатель 3 будет неподвижен, и объект находится в покое. При изменении положения входного вала с помощью задающего устройства 1 на входе усилителя 2 появляется сигнал ошибки, который после усиления приводит в действие исполнительный двигатель 3, перемещающий объект 5, а вместе с ним и движок потенциометра R_2 до тех пор, пока не будет восстановлено равенство $\alpha_{\text{вх}} = \alpha_{\text{вых}}$. Любые изменения характера движения входного вала тотчас передаются на выходной вал.

Программные системы предназначены для изменения регулируемой величины g по известному закону в функции времени t или какой-либо другой величины z : $g(t) = g^0(t)$ – временная программа; $g = g(z)$ – параметрическая программа.

Параметрические программы могут зависеть не только от одной, но и от нескольких величин – z_1, z_2, z_3 . (пространственное программирование).

Пример изображен на рис. 2.5.

Температура t в шкафу 6 (объект управления) зависит от положения заслонки 8, регулирующей приток в шкаф тепла. Заслонка перемещается через редуктор 9 двигателем 10, управляемым контактной группой, состоящей из подвижного двухстороннего контакта 2 и двух контактов 1 и 3, находящихся на качающемся рычаге 4. Положение рычага 4 и контактов 1 и 3 определяется перемещением ролика 13 (чувствительный элемент), скользящего по фигурной поверхности ленты 12, перемещаемой механизмом 11. Профиль ленты представляет программу изменения температуры в шкафу во времени.

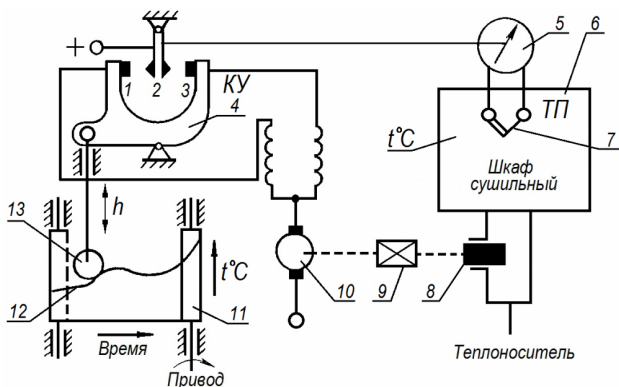


Рис. 2.5. Программная система регулирования температуры в сушильном шкафу

Если контакты незамкнуты, то двигатель *10* неподвижен, и приток тепла в шкаф не изменяется (номинальное положение). При перемещении ролика вверх происходит замыкание контактов *1* и *2*, вследствие чего двигатель выдвигает заслонку, увеличивая приток тепла в шкаф, и температура в шкафу повышается. Если ролик смещается вниз, то замыкаются контакты *2* и *3*, что сопровождается реверсом двигателя *10*, и заслонка уменьшает проходное сечение и соответственно приток тепла в шкаф. Контроль температуры в шкафу осуществляется термпарой *7* и гальванометром *5*, стрелка которого механически связана с двухсторонним контактом *2*, образуя цепь отрицательной обратной связи.

Автоматические системы прямого и непрямого управления.

По наличию в системе дополнительных источников энергии все замкнутые системы автоматического управления делятся на системы прямого и непрямого управления.

В системах *прямого управления* регулирующий орган перемещается непосредственно чувствительным элементом, без дополнительных источников энергии (см. рис. 2.3).

В системах *непрямого регулирования* имеются устройства, позволяющие усиливать сигнал ошибки. Такими устройствами являются либо специальные усилители (пневматические, гидравлические, электрические, электронные и др.), либо исполнительные элементы, питающиеся от дополнительных источников энергии, либо те и другие вместе. В результате в таких системах

сигнал ошибки управляет только передачей энергии от дополнительных источников к регулируемому органу. Поэтому системы непрямого регулирования позволяют использовать высокоточные маломощные чувствительные элементы для управления работой объектов большой мощности. Очевидно, что точность регулирования при этом резко возрастает, что и предопределяет применение главным образом систем непрямого регулирования.

Автоматические системы с замкнутой и разомкнутой цепью воздействия. САУ делятся на разомкнутые и замкнутые.

В *разомкнутых системах* выходная величина объекта $y(t)$ не измеряется, т. е. нет контроля за состоянием объекта. Следовательно, в этих системах отсутствует обратная связь между выходом объекта и входом управляющего устройства. Такое управление называется *жестким*, так как осуществляется без учета действительного значения управляемой величины, характеристик объекта и известных внешних воздействий. Возможны варианты разомкнутых САУ, в которых управляющее устройство измеряет только одно задающее воздействие g , одно возмущение f или оба эти сигнала одновременно. Разомкнутые системы пригодны лишь при достаточно высокой стабильности ее параметров и невысоких требованиях по точности.

К ним относятся различные системы сигнализации контроля, торможения, применяемые в машинах, торговые автоматы и т. п.

Непрерывные и дискретные системы автоматического управления. В процессе работы любой САУ величины x (вход) и y (выход) изменяются во времени. Динамика процесса преобразования сигнала в звене описывается некоторым уравнением $y = f(x)$ или экспериментально снятой характеристикой. По характеру динамических процессов системы делятся на непрерывные и дискретные.

Непрерывные системы – это такие системы, у которых в каждом звене непрерывному изменению входной величины соответствует непрерывное изменение выходной величины. Примеры таких систем приведены на рис. 2.3.

Дискретные системы – это системы, у которых хотя бы в одном звене при непрерывном изменении входной величины, выходная изменяется не непрерывно (импульсами, ступенями и т. п.). К ним относятся импульсные, релейные и цифровые системы.

Процесс преобразования непрерывной величины в дискретную называется *квантованием* (дроблением). Существуют три вида

квантования: по уровню; по времени; по уровню и времени. Квантование по уровню соответствует фиксации дискретных уровней сигнала в момент пересечения кривой непрерывного сигнала линий равноотстоящих уровней, т. е. осуществляется в произвольные моменты времени. Квантование по времени соответствует фиксации дискретных моментов времени, в которые уровни сигнала могут принимать произвольные значения. При квантовании по времени и уровню непрерывный сигнал заменяется дискретными значениями через равные промежутки времени, но при этом выделяется ближайший уровень непрерывного сигнала. В зависимости от характера квантования входных сигналов все дискретные элементы разделяются на импульсные, релейные, релейно-импульсные или цифровые.

Импульсные системы – это системы, в составе которых имеется импульсный элемент, который осуществляет квантование входного сигнала по времени, т. е. выходная величина этого элемента представляет собой последовательность импульсов.

Релейными системами называются системы, в составе которых имеется релейный элемент (модулятор), осуществляющий квантование входного сигнала по уровню. В качестве релейных элементов могут использоваться всякого рода реле (механические, электрические, гидравлические, пневматические) и устройства, в которых выходная величина изменяется скачком при достижении входным сигналом определенных значений. Релейные системы в отличие от импульсных являются нелинейными, так как в них моменты времени, в которые происходит замыкание и размыкание системы, заранее неизвестны. Эти моменты времени не задаются извне, а определяются внутренними свойствами самой системы (структурой, параметрами и т. п.).

Релейно-импульсные, или цифровые, системы являются более совершенными в сравнении с импульсными и релейными, так как имеют хотя бы один релейно-импульсный элемент. Наиболее перспективными релейно-импульсными системами являются цифровые, в которых выходная величина релейно-импульсного элемента представляется в виде двоичного или иного кода. Цифровые системы содержат обязательно либо простейшее вычислительное устройство, либо цифровую вычислительную машину. Релейно-импульсный элемент осуществляет квантование входного сигнала по уровню и времени

и может быть получен путем последовательного соединения импульсного и релейного элементов.

Линейные и нелинейные системы. *Линейной* называется такая система, динамика которой описывается линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными или разностными).

Статистические характеристики всех звеньев системы должны быть линейными. В том случае, если динамика всех звеньев системы описывается обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями (или линейными алгебраическими) с постоянными коэффициентами, то систему называют *обыкновенной линейной*, или *системой с сосредоточенными параметрами*. При наличии в системе одного или нескольких переменных во времени коэффициентов ее называют *линейной с переменными коэффициентами*. Если какое-либо звено описывается линейными уравнениями в частных производных, то система называется *линейной с распределенными параметрами*.

Если динамика какого-либо звена описывается линейным уравнением с запаздывающим аргументом (т. е. звено обладает чисто временным запаздыванием τ), система называется *линейной с запаздыванием*.

Линейные импульсные системы с описанием динамики линейными разностными уравнениями получили название особых линейных систем.

В любой линейной системе реакция на любую композицию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий на систему порознь. Это так называемый *принцип суперпозиции*. Он позволяет выразить реакцию системы на любое произвольное воздействие через реакцию системы на элементарное типовое воздействие, например ступенчатое.

Нелинейной называется система, в которой хотя бы в одном звене нарушается линейность статической характеристики или же имеет место любое другое нарушение линейности уравнений динамики звена (произведение переменных или их производных, корень, квадрат или более высокая степень переменной и т. п.).

Теория и прикладные методы наиболее полно разработаны для обыкновенных линейных систем. Поэтому необходимо стремиться заменять нелинейные системы линейными. Это упрощение называется линеаризацией нелинейных систем. Там, где невозможно перейти

к линейным уравнениям, систему разбивают на два блока, в одном из которых объединяется весь комплекс обыкновенных линейных звеньев. К нелинейным системам принцип суперпозиции не применим.

Одноконтурные и многоконтурные системы. Автоматические системы регулирования, имеющие только одну обратную (главную) связь, называются *одноконтурными*. В этих системах воздействие, приложенное к какому-либо элементу (чаще сравниваемому), может обойти всю систему и вернуться в исходную точку по одному пути обхода (рис. 2.3).

Системы, содержащие одну или несколько местных обратных связей, называются *многоконтурными*. В этих системах воздействие, приложенное к тому или иному элементу, может обойти всю систему и вернуться в исходную точку по нескольким путям обхода.

Статические и астатические системы. Все автоматические системы регулирования по их свойствам в установившемся режиме можно разбить на две группы – статические и астатические.

Статическими системами называются такие, у которых отклонение регулируемой величины от заданного значения в установившемся режиме пропорционально величине возмущения, вызвавшего это отклонение. В этих системах погрешность регулирования различна при разных нагрузках и лежит в основе самого принципа регулирования.

Астатическими системами автоматического регулирования называются такие системы, у которых погрешность регулирования в установившемся режиме равна нулю (в пределах зоны нечувствительности регулятора) и не зависит от нагрузки объекта.

Самонастраивающимися (самоприспосабливающимися, адаптивными) называются такие системы, в которых параметры и структура управляющего устройства (регулятора) автоматически изменяются на основе информации для осуществления требуемого (оптимального) управления объектом. Самонастраивающаяся система в процессе эксплуатации сама автоматически должна получать и использовать для выработки управляющих воздействий недостающую информацию.

Самонастраивающиеся системы принято разделять на системы с самонастройкой программы, параметров и структуры.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите принципы построения автоматических систем.
2. Приведите классификацию автоматических систем по назначению.
3. Приведите классификацию автоматических систем по характеру алгоритма функционирования.
4. Приведите классификацию автоматических систем по наличию дополнительных источников энергии.
5. Приведите классификацию автоматических систем по характеру алгоритма управления.
6. Приведите классификацию автоматических систем по виду управляющих воздействий на объект.
7. Приведите классификацию автоматических систем по математическому описанию.
8. Приведите классификацию автоматических систем по характеру передачи сигналов.
9. Приведите классификацию автоматических систем по количеству регулируемых параметров.
10. Приведите классификацию систем по виду зависимости между значением регулируемого параметра и величиной внешнего воздействия на объект.

3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ, ВЫБОР И НАСТРОЙКА

3.1. Объекты автоматизации и их характеристики

Любая САУ или САР состоит из автоматического управляющего устройства (регулятора) и объекта управления, соединенных между собой определенным образом.

Объектом управления может быть любое устройство (двигатель, трактор, транспортер, комбайн, котел и т. д.), в котором некоторые параметры нуждаются в стабилизации, регулировании и т. п.

Состояние объекта определяется рядом параметров (величин), характеризующих как воздействие на объект внешней среды и управляющих устройств, так и протекание процессов внутри самого объекта. Одни из этих величин измеряются в процессе работы и называются контролируемыми, другие, влияющие на режим работы объекта, не измеряются и называются неконтролируемыми. Если контролируемых координат (g ; y) достаточно, чтобы определить состояние объекта, то объект называется полностью наблюдаемым. Если с помощью управляющих воздействий u_i , можно однозначно задать состояние объекта (вектор x), то объект называется *полностью управляемым*.

Если объект характеризуется одной управляющей и одной управляемой величиной, т. е. векторы u и y имеют по одной координате, то объект называется *простым*, или *односвязным*. При наличии нескольких взаимно связанных координат векторов u и y объект называется *многосвязным*.

В зависимости от характера изменения регулируемого параметра под действием постоянного по величине возмущения объекты бывают статические (рис. 3.1, a , кривая 3), астатические (кривая 2) и неустойчивые (кривая 1).

Примером статического объекта может служить, например, подогреватель, в котором с увеличением подачи тепла повышается температура. Одновременно возрастает и отдача тепла подогревателем в окружающую среду. Тем не менее, повышение температуры не может быть безграничным, так как при определенном значении ее рост потерь приводит к новому состоянию равновесия.

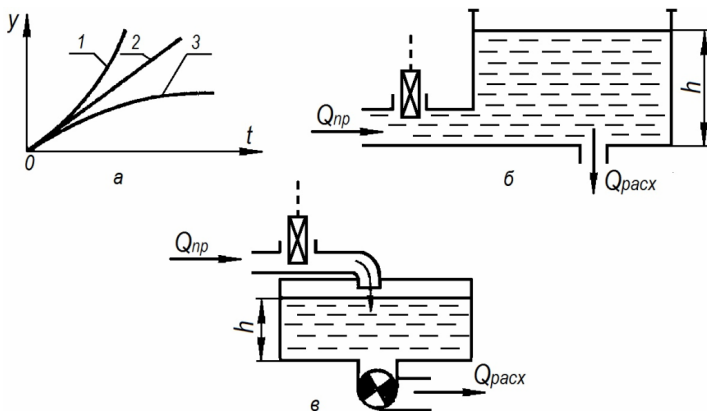


Рис. 3.1. Объекты автоматизации и их характеристики

Статический объект можно проиллюстрировать и на примере резервуара с водой при подаче воды под уровень (рис. 3.1, б). В установившемся состоянии приток равен расходу $Q_{пр} = Q_{расх}$ и $h = const$. Если увеличить приток, то уровень начинает увеличиваться, но вместе с тем возрастает и противодавление притоку, что приводит к его уменьшению, и постепенно установится новое значение уровня $h + \Delta h = const$, при котором также $Q_{пр} = Q_{расх}$.

Примером астатического объекта может служить резервуар с водой при подаче ее над уровнем. Ее расход обеспечивается насосом, вращающимся с постоянной скоростью (рис. 3.1, в). В этом резервуаре величина уровня h не влияет как на ее приток $Q_{пр}$, так и на ее расход, зависящий от производительности насоса.

В зависимости от способности сохранять состояние равновесия объекты разделяются на устойчивые, неустойчивые и нейтральные. Устойчивые называются также объектами с самовыравниванием.

В зависимости от вида дифференциальных уравнений, описывающих поведение объекта, объекты бывают линейными и нелинейными.

Классификация объектов автоматизации сельскохозяйственного назначения целесообразна по видам выполняемых работ, назначению машин и механизмов. Например, почвообрабатывающие, посевные, уборочные машины в полеводстве, машины для заготовки, транспортировки и смешивания кормов в животноводстве и т. п.

Каждый объект регулирования можно охарактеризовать одним или несколькими количественными и качественными величинами (параметрами). Такие величины, как мощность, расход, скорость, напряжение и т. д., могут изменяться в широких пределах. Как правило, законы этих изменений во времени произвольны и носят случайный характер. Однако можно выделить ряд величин, которые присущи любому объекту автоматического управления.

Емкость объекта. Уравнение динамики объекта регулирования в общем виде можно записать (для бесконечно малого отрезка времени, когда зависимость между y и $E_1 - E_2$ можно считать линейной):

$$c \frac{dy}{dt} = E_1 - E_2,$$

где c – постоянная объекта, называемая емкостью объекта, характеризующая его способность запасать энергию;

dy / dt – скорость изменения регулируемого параметра;

E_1, E_2 – подводимая и отводимая к объекту энергия.

Если $\Delta E = E_1 - E_2 > 0$, то в объекте накапливается энергия, что сопровождается увеличением регулируемого параметра y , т. е. $\Delta y = y_1 - y_2 > 0$.

Если $\Delta E = E_1 - E_2 < 0$, то запас энергии в объекте снижается, и $\Delta y < 0$, т. е. регулируемый параметр уменьшается.

Для многих объектов величины подводимой и затрачиваемой энергии в той или иной степени зависят от значения регулируемого параметра.

Условие $E_1 = E_2$ соответствует состоянию равновесия объекта. При отклонении регулируемого параметра y от заданного y_0 в ту или иную сторону равновесие объекта нарушается.

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

Время разгона – это время, в течение которого регулируемый параметр изменяется от нуля до номинального значения при 100 %

или максимальном возмущении (управлении) при условии, что нагрузка отсутствует и скорость изменения dy / dt остается в течение этого времени постоянной (рис. 3.2).

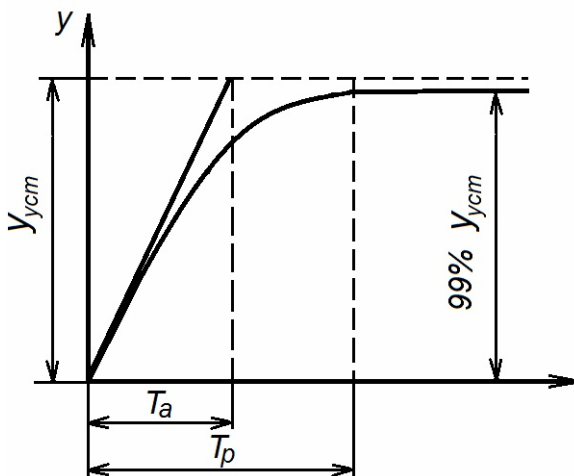


Рис. 3.2. График временной характеристики автоматической системы

Время разгона может быть определено экспериментально по переходной характеристике или аналитически по формуле

$$T_p = c \frac{y_{\max}}{Q_{\max}},$$

где y_{\max} — максимальное значение регулируемого параметра;

Q_{\max} — максимальное значение притока или стока вещества или энергии.

Время разгона для одноемкостного объекта может быть определено как $T_p = T / k$.

Чувствительность объекта. Чувствительность, или скорость разгона, объекта представляет величину, обратную времени разгона $\varepsilon = 1 / T_p$. Если $\varepsilon \rightarrow \infty$, $T_p \rightarrow 0$ — объект представляет собой усилительное звено. Если $\varepsilon \rightarrow 0$, $T_p \rightarrow \infty$ — объект нерегулируемый, т. е. y не зависит от x .

Постоянная времени объекта представляет собой время, в течение которого регулируемый параметр достигает нового установившегося значения при неизменных притоке и расходе вещества или энергии для данного объекта, лишённого самовыравнивания. Постоянная времени T_a определяется аналитически или графически, путем проведения касательной к кривой разгона объекта. Значение T_a можно принимать равным

$$T_a = \frac{1}{3 \dots 4} T_p.$$

Самовыравнивание объекта – это свойство объекта после возникновения возмущения приходить в состояние равновесия без внешнего вмешательства (без регулятора), причем каждому возмущению соответствует свое значение регулируемого параметра. Оценивается самовыравнивание степенью или коэффициентом самовыравнивания δ (иногда его называют коэффициентом статизма или саморегулирования).

Например, для одноемкостного объекта (резервуара):

$$\delta = \frac{H}{Q} \left[\left(\frac{dQ_p}{dH} \right)_0 + \left(- \frac{dQ_n}{dH} \right)_0 \right],$$

где Q_p , Q_n – расход и приток вещества;

H – обобщенная координата уровня (индекс «нуль» означает установившееся состояние).

Если при любом значении относительного возмущения (ΔQ или ΔH), отличном от нуля, регулируемая величина изменяется непрерывно в одну сторону (увеличивается или уменьшается), то такой объект называется объектом без самовыравнивания ($\delta = 0$). Если же при скачкообразном изменении притока или расхода вещества (возмущения) управляемая величина через некоторое время принимает установившееся значение (без регулятора), то такой объект называется объектом с самовыравниванием (рис. 3.3, а).

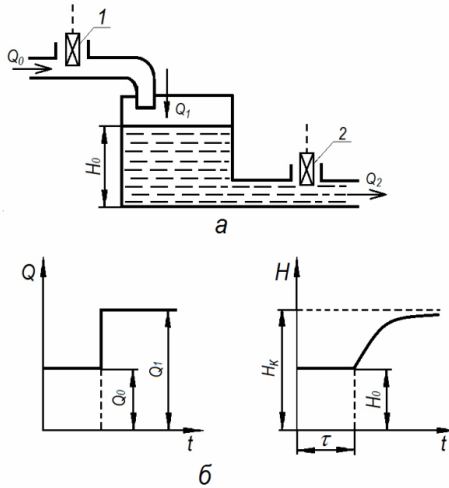


Рис. 3.3. Объекты автоматизации с самовыравниванием

Если оба вентиля 1 и 2 будут иметь одинаковую степень открытия, то приток будет неизменным, а расход будет зависеть от уровня воды в баке. Если теперь при установившемся режиме ($Q_0 = Q_2$) и при высоте уровня воды, равной H_0 , увеличить приток до Q_1 (рис. 3.3, б) путем открытия вентиля 1 , то уровень воды в баке начнет возрастать, что приведет к повышению давления на нижние слои воды, а это вызовет больший расход Q_2 . Через некоторое время, когда $Q_1 = Q_2$, уровень воды примет новое установившееся значение H_k .

Самовыравнивание объекта значительно облегчает работу регулятора за счет стабилизации регулируемой величины самим объектом. Самовыравниванием обладают двигатели любого типа (электрические, гидравлические, тепловые, пневматические).

Самовыравнивание характеризуется и временем самовыравнивания t , т. е. временем, за которое в объекте устанавливается новое установившееся состояние:

$$t \approx 3T_a \approx 3T_p / \delta.$$

Запаздывание в объекте. Одной из важнейших характеристик объекта регулирования является так называемое запаздывание. Сущность его состоит в том, что с увеличением или уменьшением

нагрузки (расходе энергии, вещества) в объекте параметры изменяют свое значение не сразу, а спустя некоторое время с момента возмущения (рис. 3.3, б). При этом различают два вида запаздывания: передаточное (транспортное) τ_t и переходное τ_n . Время общего запаздывания $\tau_{об} = \tau_t + \tau_n$.

Транспортное запаздывание τ_t может быть вызвано тем, что датчик и регулирующий орган находятся на значительном расстоянии, наличием в объекте участков (транспортеров, длинных труб и других транспортных устройств), передача сигналов по которым требует некоторого времени.

Переходное запаздывание τ_n (иногда его называют емкостным) – это промежуток времени от момента возмущения до начала изменения параметра. Например, для изменения температуры воздуха в помещении необходимо некоторое время на прогрев потолка, стен, пола и предметов, находящихся в помещении, после чего в нем установится заданная температура.

3.2. Понятие о законах регулирования

Законом регулирования называют математическую зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект U формировалось бы безынерционным регулятором в функции от ошибки системы x .

Наиболее распространенными (типовыми) являются следующие законы регулирования.

Пропорциональный закон регулирования характеризуется пропорциональной зависимостью (рис. 3.4, а) между управляющим воздействием на объект U и ошибкой регулирования x :

$$U = k_1 x.$$

Интегральный закон: управляющее воздействие на объект формируется пропорционально интегралу ошибки (рис. 3.4, б):

$$U = k_2 \int_0^t x dt.$$

Интегральное регулирование может быть осуществлено с помощью каких-либо интегрирующих звеньев.

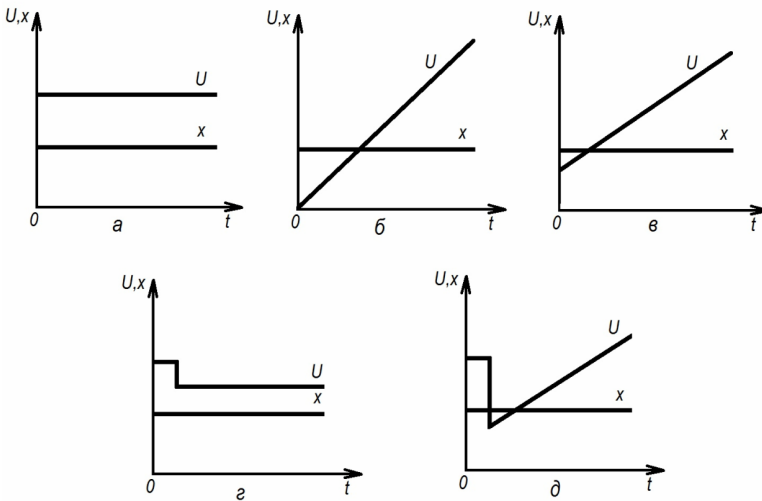


Рис. 3.4. Законы регулирования

Пропорционально-интегральный закон объединяет два закона регулирования: пропорциональный и интегральный (рис. 3.4, е). Управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и интегралу ошибки:

$$U = k_2 \int_0^t x dt + xk_1.$$

Регулирование по интегральному и пропорциональному законам называется также издромным регулированием. Последнее сочетает в себе высокую точность интегрального регулирования (астатизм) с большим быстродействием пропорционального регулирования.

Пропорционально-дифференциальный закон. Регулирование по первой производной от ошибки (принцип Сименсов) не имеет самостоятельного значения из-за того, что в установившемся состоянии производная от ошибки равна нулю (регулирование прекращается):

$$U = k_3 \frac{dx}{dt} = k_3 px - (\text{дифференциальный закон}).$$

Поэтому используется пропорционально-дифференциальный закон регулирования (рис. 3.4, з), что позволяет учитывать не только наличие ошибки, но и тенденцию к росту или уменьшению ее, управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и производной ошибки:

$$U = k_1 x + k_3 \frac{dx}{dt}.$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования объединяет три закона (рис. 3.4, д) и математически выражается:

$$U = k_1 x + k_2 \int_0^t x dt + k_3 \frac{dx}{dt}.$$

Включение интеграла в закон регулирования приводит к исключению статической ошибки (т. е. к астатичности регулятора), а включение в этот закон производной позволяет регулятору работать с предварением (постоянная дифференцирования называется временем предварения).

Позиционные законы управления, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд дискретных значений в зависимости от ошибки системы.

3.3. Классификация автоматических регуляторов, их выбор и настройка

Автоматический регулятор – устройство или совокупность устройств, с помощью которых осуществляется управление главным технологическим параметром (физической величиной).

Основной классификационный признак автоматических регуляторов – закон регулирования. В соответствии с этим признаком основные типы регуляторов – позиционные и непрерывного действия.

Последние, в свою очередь, делятся на пропорциональные; интегральные; пропорционально-интегральные; пропорционально-дифференциальные и пропорционально-интегрально-дифференциальные.

Пропорциональным (П-регулятором) называется регулятор, у которого перемещение рабочего органа пропорционально ошибке регулирования.

Основным достоинством П-регуляторов является их относительная простота, отсутствие корректирующих устройств. Однако точность работы этих регуляторов невысока, т. е. реализация пропорционального закона регулирования приводит к появлению статической ошибки. Поэтому П-регуляторы иногда называются статическими.

Параметром настройки для П-регулятора является коэффициент усиления k_p . Величина обратная статическому коэффициенту передачи регулятора $1 / k_p$ называется коэффициентом неравномерности, а величина $(1 / k_p) 100$ – степенью неравномерности, или диапазоном дросселирования D .

Интегральным, или *астатическим*, называется регулятор, у которого при отклонении регулируемого параметра от заданного значения регулирующий орган будет перемещаться до тех пор, пока регулируемый параметр не достигнет заданного значения.

В динамическом отношении И-регулятор представляет собой интегрирующее звено.

И-закон регулирования в регуляторах получается тогда, когда структурная схема составлена из последовательно включенных усилительного и интегрирующего звеньев.

Если в состав регулятора входят и другие звенья, то последние должны быть охвачены глубокой отрицательной обратной связью. В качестве интегрирующего звена может быть какой-либо интегрирующий привод (гидравлический сервопривод, электродвигатель постоянного тока и др.).

Параметром настройки для И-регулятора является постоянная времени интегрирования $T_{и}$.

Пропорционально-интегральным (ПИ-регулятором) называется регулятор, который перемещает рабочий орган на величину, пропорциональную сумме отклонения и интеграла отклонения регулируемой величины.

Пропорционально-интегральный регулятор в динамическом отношении эквивалентен пропорциональному с коэффициентом передачи k_p и И-регулятору с коэффициентом передачи $1/T_i$, соединённым параллельно.

Параметрами настройки ПИ-регулятора являются коэффициент передачи k_p и постоянная времени T_i .

Пропорционально-дифференциальным (ПД-регулятором) называется регулятор, который перемещает рабочий орган пропорционально отклонению и скорости отклонения регулируемой величины.

Параметрами настройки ПД-регулятора являются коэффициент передачи k_p и время предварения T_n (время дифференцирования). Регуляторы ПД выполняются обычно непрямого действия.

Предварение у ПД-регуляторов бывает прямое и обратное. Прямое предварение проявляется во временном увеличении коэффициента передачи, а обратное – в уменьшении его.

ПД-регуляторы уменьшают колебания и ускоряют затухание переходного процесса.

Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы) перемещают рабочий орган пропорционально отклонению, интегралу и скорости отклонения регулируемой величины.

ПИД-регуляторы применяются на объектах регулирования, не допускающих статической неравномерности, у которых нагрузка меняется часто и резко и имеется запаздывание. ПИД-регулятор имеет три параметра настройки: k_p , T_i , T_n .

Автоматические регуляторы так же, как и системы автоматического регулирования, классифицируются по различным признакам.

По роду используемой для привода энергии регуляторы бывают электрические, гидравлические, пневматические и сочетающие их модификации.

Достоинства электрических регуляторов: широкие возможности по усилению, преобразованию, управление на больших расстояниях, возможность применения стандартных электро- и радиоэлементов. Недостатки: сложность исполнительных элементов, небольшой крутящий момент, развиваемый исполнительным элементом, особенно при малых скоростях, невысокая безопасность, особенно в помещениях с агрессивной средой и др.

Преимуществом гидравлических регуляторов являются высокая надежность работы, хорошие динамические свойства исполнительных

механизмов, значительные выходные усилия и моменты, высокое быстродействие. В случае применения минеральных масел – взрывобезопасны.

Достоинства пневматических регуляторов: взрывобезопасность, отсутствие сливных трубопроводов, высокое быстродействие, значительные усилия и моменты исполнительных механизмов и т. п. Недостаток – сжимаемость воздуха и значительная инерционность (по отношению к гидравлическим).

В зависимости от характера и числа регулируемых величин, принципа регулирования, источников энергии различают регуляторы давления, скорости вращения, напряжения, температуры и т. п.; работающие по отклонению (ошибке), по возмущению и комбинированные; прямого и непрямого действия; одномерные и многомерные.

Выбор регуляторов. Выбор регулятора зависит от свойств объекта регулирования, которые в основном определяются его динамической характеристикой (k_0 – коэффициентом передачи, τ – запаздыванием, T – постоянной времени).

П-регуляторы целесообразно применять в объектах с небольшим запаздыванием и изменением нагрузки, в системах, где допускается статическая ошибка. П-регуляторы не рекомендуются при колебательной нагрузке.

И-регуляторы используются для объектов со значительным самовыравниванием и небольшим запаздыванием, а также при малой и большой емкостях объекта и при медленно изменяющейся нагрузке.

ПИ-регуляторы применяются в объектах с любой ёмкостью, с большим запаздыванием ($\tau > 0,1T_{и}$), а также при больших и малых изменениях нагрузки. ПИД-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, при очень малой статической ошибке регулирования и при существенных запаздываниях в объекте.

Импульсные регуляторы лучше применять в объектах без большого запаздывания, при средней емкости объекта, где нагрузка постоянная или мало изменяется.

Двухпозиционные релейные регуляторы рекомендуется применять в объектах с большой емкостью, без большого запаздывания при постоянной или мало изменяющейся нагрузке. Если сведений о динамических свойствах объекта недостаточно или они отсутствуют, выбор регуляторов производится по аналогии с действующими САУ.

Тип регулятора может быть ориентировочно выбран и по отношению τ / T . При $\tau / T < 0,2$ применяют релейный регулятор, при $\tau / T = 0,2-1$ – непрерывный и при $\tau / T > 1$ – импульсный. Если кривые разгона могут быть экспериментально сняты с действующих аналогичных объектов или они известны заранее для проектируемых объектов, то выбор регуляторов следует производить на основании расчета. Методика расчета для статических и астатических объектов изложена в специальной литературе.

Настройка регуляторов

Как известно из теории автоматического регулирования, качество работы системы регулирования определяется характером переходного периода (функций). Быстрота затухания переходного периода и устойчивость регулирования зависят не только от статических и динамических свойств регулируемого объекта, но и от свойств регулятора, а поэтому каждая система (регулятор и объект регулирования) образуют взаимосвязанный контур регулирования.

Динамическая настройка автоматических регуляторов сводится к определению и установке настройки (коэффициента передачи регулятора, времени издрорма, времени предварения и т. д.), обеспечивающей требуемое качество работы системы автоматического регулирования в процессе ее эксплуатации.

Требования к качеству работы САР должны быть сформулированы на первом этапе расчета настройки регулятора в виде критерия оптимальности, представляющего собой дополнительное требование к качеству автоматического регулирования. Основным требованием является получение устойчивой работы САР.

Переходный процесс в автоматической системе должен по возможности иметь минимальное время регулирования, сравнительно небольшое динамическое отклонение регулируемой величины, небольшое перерегулирование и минимальную статическую ошибку. Однако удовлетворить все перечисленные требования одновременно ни одним регулятором невозможно.

Поэтому параметры регуляторов принято настраивать на один из трех типовых переходных процессов регулирования (рис. 3.5).

Апериодический — характеризуется минимальным временем регулирования для объектов с самовыравниванием (для объектов без самовыравнивания время регулирования велико), отсутствием

перерегулирования, небольшим управляющим воздействием. Вместе с тем динамическое отклонение в этом процессе максимально. Такой тип переходного процесса рекомендуется в тех случаях, когда объект имеет несколько регулируемых величин и необходимо, чтобы регулирующее воздействие для рассматриваемой величины не оказывало нежелательного влияния на другие регулируемые величины.

Процесс с 20 %-ным перерегулированием (со степенью затухания близкой к $\Psi = 0,85-0,95$), который характеризуется наличием перерегулирования и уменьшенным динамическим отклонением регулируемой величины. Применяется к объектам, допускающим перерегулирование, но чувствительным к большим динамическим отклонениям.

Процесс с минимальной площадью отклонения регулируемой величины характеризуется малым значением динамического отклонения, обеспечивает минимум интегральной квадратичной

оценки, равной $\int_0^{\infty} \Delta y^2 dt$; однако перерегулирование здесь большое, увеличивается время регулирования и требуется значительное управляющее воздействие на объект. Этот процесс применяют для тех объектов, в которых по техническим требованиям не допускается большое отклонение регулируемой величины.

Этот процесс применяют для тех объектов, в которых по техническим требованиям не допускается большое отклонение регулируемой величины.

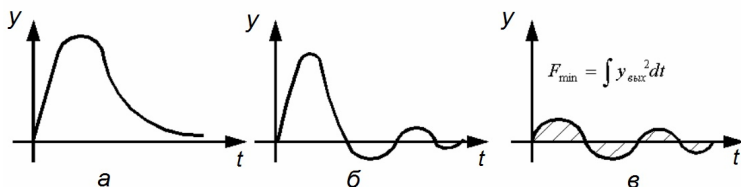


Рис. 3.5. Характеристики типовых переходных процессов:
a – аperiodический; *б* – с 20 %-м перерегулированием;
в – с минимальной площадью под кривой переходного процесса

Для большинства систем автоматической стабилизации при непрерывном регулирующем воздействии таким оптимальным процессом регулирования мог бы быть процесс с интенсивным затуханием, минимальными временем регулирования и отклонением

регулируемой переменной. Однако в реальных условиях одновременная оптимизация всех показателей качества процесса регулирования невозможна. Поэтому динамическая настройка автоматических регуляторов выполняется из условий оптимизации только одного, заранее выбранного в качестве критерия оптимальности, показателя качества процесса регулирования.

Выбор критерия оптимальности процесса регулирования производится прежде всего на основании требований технологического регламента. При этом необходимо также учитывать достоверность информации об объекте и регуляторе и другие, в том числе, экономические факторы.

С экономической точки зрения наиболее целесообразно применение в качестве критерия оптимальности интегральной квадратичной оценки, так как минимизация такого критерия почти всегда приводит к минимизации потерь, возникающих в процессе регулирования. Однако, если информация о свойствах объекта и регулятора недостаточно надежна, к выбору указанного критерия следует подходить осторожно, так как переходные процессы в системах, настроенных на минимум такого критерия, слабо затухают, и всегда существует опасность перехода таких систем под действием неучтенных воздействий из области параметров настройки близких к границе устойчивости, на границу устойчивости или даже в область неустойчивой работы системы.

В этом плане преимуществом обладают процессы с минимальным временем регулирования или без перерегулирования; так как системы, настроенные на такие процессы, обладают наибольшим запасом устойчивости.

Чаще всего в налаточной практике настраивают регуляторы на колебательный переходный процесс со степенью затухания $\Psi = 0,85-0,95$ (близкий к процессу с 20 %-м перерегулированием). При этом динамическая ошибка и время регулирования оказываются сравнительно небольшими и качество регулирования приемлемым.

Этапы настройки регуляторов

- 1) Формирование требований к качеству регулирования (выбор критерия оптимальности).
- 2) Определение динамических характеристик объекта управления.
- 3) Расчет параметров настройки.

- 4) Реализация настроек.
- 5) Уточнение параметров.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое объект автоматизации? Назовите его характеристики.
2. Сформулируйте пропорциональный закон регулирования.
3. Сформулируйте интегральный закон регулирования.
4. Сформулируйте пропорционально-интегральный закон регулирования.
5. Сформулируйте пропорционально-дифференциальный закон регулирования.
6. Сформулируйте пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования.
7. Назовите основные правила выбора автоматических регуляторов.
8. Назовите этапы настройки регуляторов.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ

4.1. Понятие технического средства автоматики

Любая самая сложная автоматическая система состоит из определенного комплекса элементов. Многообразие автоматических систем порождает и многообразие элементов, которые представляют собой некие технические средства.

Технические средства (ТС) автоматизации – приборы, устройства и технические системы, предназначенные для автоматизации производства. ТС обеспечивают автоматическое получение, передачу, преобразование, сравнение и использование информации в целях контроля и управления производственными процессами и автоматизации производства. Развитие ТС автоматизации является сложным процессом, в основе которого лежат экономические интересы и технические потребности автоматизируемых производств, с одной стороны, и те же интересы и технологические возможности производителей ТС автоматизации, – с другой. Первичным стимулом развития является повышение экономической эффективности работы предприятий, благодаря внедрению новых, более совершенных ТС автоматизации.

В развитии экономических и технических предпосылок внедрения и использования ТС автоматизации ТП можно выделить следующие этапы:

1. Начальный этап, для которого характерны избыток дешевой рабочей силы, низкая производительность труда, малая единичная мощность агрегатов и установок. Благодаря этому самое широкое участие человека в управлении ТП, т. е. наблюдение за объектом управления, а также принятие и исполнение управляющих решений на данном этапе было экономически оправданным. Механизации и автоматизации подлежали только те отдельные процессы и операции, управление которыми человек не мог осуществлять достаточно надежно по своим психофизиологическим данным, т. е. технологические операции, требовавшие больших мускульных усилий, быстроты реакции, повышенного внимания и др.

2. Переход к этапу комплексной механизации и автоматизации производства произошел благодаря росту производительности труда, укрупнению единичной мощности агрегатов и установок,

развитию материальной и научно-технической базы автоматизации. На этом этапе, при управлении ТП человек-оператор все более занимается умственным трудом, выполняя разнообразные логические операции при пусках и остановках объектов, особенно при возникновении всевозможных непредвиденных обстоятельств, предаварийных и аварийных ситуаций, а также оценивает состояние объекта, контролирует и резервирует работу автоматических систем. На данном этапе формируются основы крупносерийного производства ТС автоматизации, ориентированного на широкое применение стандартизации, специализации и кооперации. Широкие масштабы производства средств автоматизации и специфика их изготовления приводят к постепенному выделению этого производства в самостоятельную отрасль.

4.2. Классификация технических средств автоматики

Технические средства автоматики чрезвычайно разнообразны по выполняемым функциям, конструкции, принципу действия, характеристикам, физической природе преобразуемых сигналов и т. д.

В зависимости от того, как элементы получают энергию, необходимую для преобразования входных сигналов, они делятся на:

- пассивные;
- активные.

Пассивные элементы автоматики – это элементы, у которых входное воздействие (сигнал $x_{вх}$) преобразуется в выходное воздействие (сигнал $x_{вых}$) за счет энергии входного сигнала (например, редуктор). Активные элементы автоматики для преобразования входного сигнала используют энергию от вспомогательного источника (например, двигатель, усилитель).

В зависимости от энергии на входе и выходе элементы автоматики подразделяются на:

- электрические;
- гидравлические;
- пневматические;
- механические;
- комбинированные.

По выполняемым функциям в системах регулирования и управления элементы автоматики подразделяются на:

- датчики;

- усилители;
- исполнительные устройства;
- переключающие устройства;
- вычислительные элементы;
- согласующие элементы;
- вспомогательные элементы и т. д.

Любой элемент в САУ может рассматриваться в виде структуры, осуществляющей преобразование входного сигнала в выходной. В соответствии с таким представлением все элементы автоматики имеют общие технические характеристики и свойства, из которых можно выделить пять основных групп: статические, динамические, точностные, эксплуатационные и экономические.

К *статическим характеристикам* относятся: коэффициент передачи (чувствительность), линейность характеристики, предельные значения входных и выходных параметров (порог чувствительности, зоны нечувствительности или неоднозначности, параметры насыщения, рабочие диапазоны изменения сигналов и параметров), входная и выходная мощность, номинальные значения параметров и сигналов и т. п.

В качестве *динамических характеристик* рассматривают переходные характеристики, показатели качества переходного процесса (постоянные времени, перерегулирование, запаздывание) и ряд других параметров.

К *точностным характеристикам* относят статическую и динамическую погрешность.

Эксплуатационные характеристики связаны со стабильностью характеристик и параметров в условиях нормальной эксплуатации, устойчивостью к внешним возмущениям (термостойкостью, вибростойкостью и т. п.), временем подготовки к работе, безопасностью при эксплуатации, ремонтпригодностью и взаимозаменяемостью, размерами, энергоемкостью, сохраняемостью, энергообеспечиваемостью и т. п.

К *экономическим характеристикам* относятся надежность, стоимость, энергетический КПД, ресурс работы.

Статические характеристики описывают соотношения, существующие между величинами и их производными, когда система находится в установившемся состоянии. Существует несколько способов представления статических характеристик:

- графический;

- в виде таблиц;
- в виде алгебраических уравнений.

На рис. 4.1 приведены примеры статических характеристик элементов автоматики.

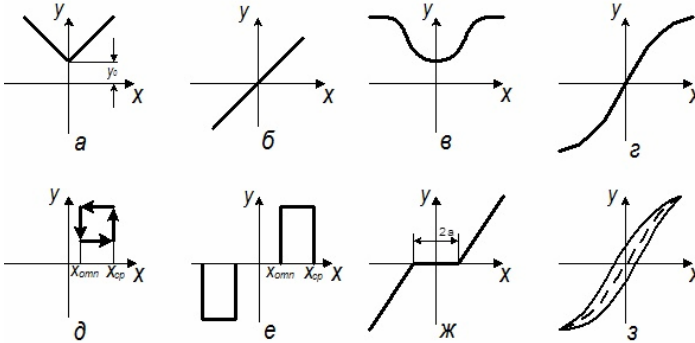


Рис. 4.1. Примеры статических характеристик элементов автоматики:
 а – линейная нереверсивная; б – линейная реверсивная;
 в – нелинейная нереверсивная; г – нелинейная реверсивная;
 д – релейная нереверсивная; е – релейная реверсивная;
 ж – с зоной нечувствительности (явление сухого трения);
 з – для ферромагнитных элементов

Динамические характеристики задаются:

- графически, в виде временных характеристик;
- в виде дифференциальных уравнений или передаточных функций;
- в виде частотных характеристик.

По виду характеристик элементы подразделяются на *линейные* и *нелинейные*.

Общим для статических характеристик релейных элементов является наличие явления неоднозначности (гистерезиса), которое проявляется в неоднозначной связи выходного и входного параметров. Значение выходного параметра определяется не только значением входного параметра, но также предшествующим ему состоянием элемента.

4.3. Первичные измерительные преобразователи (датчики)

Датчиком называется устройство, предназначенное для преобразования информации, поступающей на его вход в виде некоторой

физической величины, в другую функциональную физическую величину, удобную для использования в последующих элементах автоматической системы. Следовательно, датчик в общем виде можно представить состоящим из чувствительного элемента ЧЭ и преобразователя ПЭ (рис. 4.2). В случае, если в датчике не происходит преобразования сигналов, он включает только чувствительный элемент.

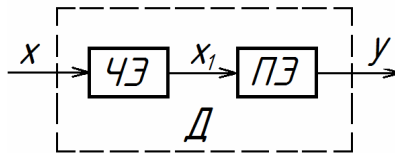


Рис. 4.2. Функциональная схема датчика

Большинство известных в автоматике и телемеханике датчиков преобразуют неэлектрическую контролируемую величину x в электрическую величину y (например, механическое перемещение в индуктивность или напряжение, температуру в ЭДС и т. п.) или неэлектрическую величину в неэлектрическую (например, механическое перемещение в давление воздуха или жидкости и др.). Следовательно, по роду энергии выходной величины различают электрические и неэлектрические датчики.

Все электрические датчики по принципу действия или производимого ими преобразования сигналов подразделяются на параметрические, преобразующие неэлектрические величины в электрические (сопротивление R , емкость C , индуктивность L), и генераторные, преобразующие неэлектрические величины в ЭДС. Наличие постороннего источника энергии является обязательным условием работы параметрического датчика.

К *параметрическим датчикам* относятся контактные, реостатные, потенциометрические, тензодатчики, терморезисторы, емкостные, индуктивные, электронные, фоторезисторные и др., к *генераторным* – термоэлектрические (термопары), индукционные, пьезоэлектрические, вентильные фотоэлементы.

Неэлектрические датчики подразделяются на механические, пневматические, гидравлические и др.

Датчики классифицируют по различным признакам, но прежде всего по виду измеряемой величины и принципу действия.

Основными характеристиками датчиков являются: статическая характеристика, чувствительность, порог чувствительности, динамическая характеристика, погрешность преобразования, выходная мощность и выходное сопротивление.

Статическая характеристика показывает зависимость выходной величины y от входной величины x :

$$y=f(x).$$

Чувствительность, или коэффициент преобразования, представляет собой отношение выходной величины y к входной величине x .

Для датчиков с линейной статической характеристикой (рис. 4.3, кривая 2) чувствительность постоянная:

$$k_c = \frac{y}{x}.$$

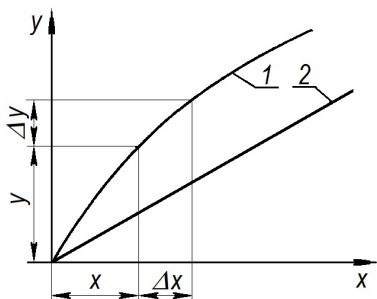


Рис. 4.3. Статические характеристики датчиков

Для датчиков с нелинейной характеристикой кривую 1 чувствительности называют дифференциальной и для разных точек характеристики определяют по формуле

$$k_d \approx \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Порогом чувствительности называется минимальная величина на входе датчика, которая вызывает изменение его выходной величины.

Порог чувствительности вызывается как внешними, так и внутренними факторами (трение, люфты, гистерезис, помехи и др.).

Абсолютная погрешность датчика (ошибка) – разность между действительным значением выходной величины y' и ее расчетным значением y , т. е.:

$$\Delta y = y' - y.$$

$$\text{Относительная погрешность } \gamma = \frac{\Delta y}{y} 100.$$

Динамические свойства датчиков определяются по динамическим (временным и частотным) характеристикам.

4.4. Механические датчики

Наиболее простыми средствами получения информации о различных параметрах сельскохозяйственных технологических процессов (о расположении растений, корней свеклы, маркерной борозды, наличии корма на транспорте, уровня воды в емкости и др.) служат механические датчики – щупы, стержни, полозки, катки и т. п.

Механический чувствительный элемент (щуп) связан, как правило, с преобразовательно-усилительным звеном и находится в состоянии силового замыкания с источником информации (рис. 4.4). Определенная силовая настройка щупа позволяет выделить полезный сигнал, например, культурные растения, поэтому его тип выбирают в зависимости от физико-механических свойств источника информации.

На рис. 4.4, *а* полозок 1 кинематически через тягу 2 связан с преобразователем 4 типа сопло-заслонка, формирующим давление p_3 , пропорциональное усилию сжатия пружины 3. Поршень 5 выполняет функцию заслонки.

На рис. 4.4, *б* посредством рычажной системы и демпфирующего устройства 2 полозок 1 соединен с гидрораспределителем 3, который вырабатывает управляющий сигнал.

На рис. 4.4, *в* копиры 1, движущиеся по рядам свеклы, при сближении на угол рассогласования φ посредством тяги 3 вызывают смещение x золотника гидрораспределителя 2.

Если пренебречь упругостью механизма передачи, то для малых отклонений $x = k\varphi$.

На рис. 4.4, *з* приведена схема чувствительного элемента системы регулирования высоты среза ботвы корнеуборочными машинами.

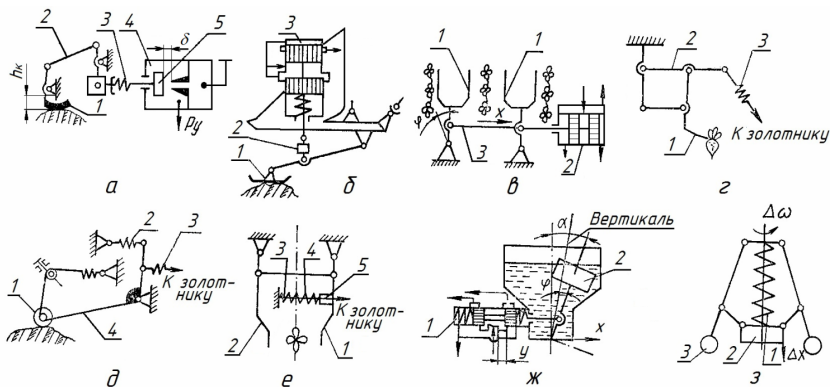


Рис. 4.4. Механические датчики

Чувствительный элемент (рис. 4.4, *д*) состоит из копирующих катков *1* (обычно их четыре), связанных кинематически уравновешивающей пружиной *2*, демпфера *3* и рычажной системы *4*, воздействующей на золотник гидрораспределителя.

На рис. 4.4, *е* приведена схема чувствительного элемента системы автоматизации пропашного культиватора при наличии пропусков растений в рядах. Щупы *1, 2* самоустанавливаются в нейтральное положение при отсутствии растений под действием пружин *3, 4*, надетых на штангу *5*, соединенную с золотником гидрораспределителя.

Для устранения угловых перемещений молотилок зерноуборочных комбайнов или крена остова машин при работе на склонах применяют следящие системы с измерительно-преобразующими устройствами, в которых поплавковый (рис. 4.4, *ж*) чувствительный элемент *2* кинематически связан с золотниковым гидрораспределителем *1*. Входной величиной для них является отклонение поплавка от вертикального положения на угол φ , выходной – смещение u золотника из нейтрального положения.

К механическим чувствительным элементам относятся также различные типы пружинных, маятниковых и осевых экселерометров.

Так, в регуляторах скорости дизельных двигателей применяют центробежный преобразователь угловой скорости ω в механическое перемещение x муфты 2 (рис. 4.4, з), связанный с рейкой топливного насоса. Роль чувствительного элемента выполняет груз 1, роль задающего устройства – пружина 3.

Механические измерительные устройства с электроконтактами могут быть построены по принципу непосредственного измерения регулируемой величины электрическим методом или определения ее механическим чувствительным элементом, воздействующим на электрические контакты. В устройствах первого типа используется принцип электрической проводимости сельскохозяйственных материалов.

На рис. 4.5, а показано механическое измерительное устройство с электроконтактами, используемое в электрогидравлическом регуляторе высоты среза зерноуборочного комбайна. Оно состоит из чувствительных элементов 1, вала 2, шарнирно закрепленного под режущим аппаратом жатки 3, и контактной группы. На конце вала установлен кулачок 5, воздействующий на конечный выключатель 4, который замыкает цепи электромагнитов управляющего золотника. При встрече с препятствием копиры приподнимаются и поворачивают вал с кулачком, который нажимает на кнопку конечного выключателя 5, последовательно размыкающего цепь электромагнита опускания и замыкающего цепь электромагнита подъема.

На рис. 4.5, б показан механический чувствительный элемент (щуп) 2 с электроконтактами 1, используемый в системе автоматического направления движения пропашного тракторного агрегата по борозде. Щуп 2, отклоняясь под воздействием стенок борозды, замыкает контакты 1, которые включены в цепь электромагнитов электрогидрозолотникового распределителя, управляющего гидроусилителем руля.

Аналогичное устройство (рис. 4.5, в) используется в системе автоматического направления движения культиватора. При отклонениях рабочих органов культиватора в защитную зону рядков растений щуп 1, выполненный в виде поводка, поворачивается и замыкает один из контактов 2 реле 3 или 4 электрогидравлического золотника.

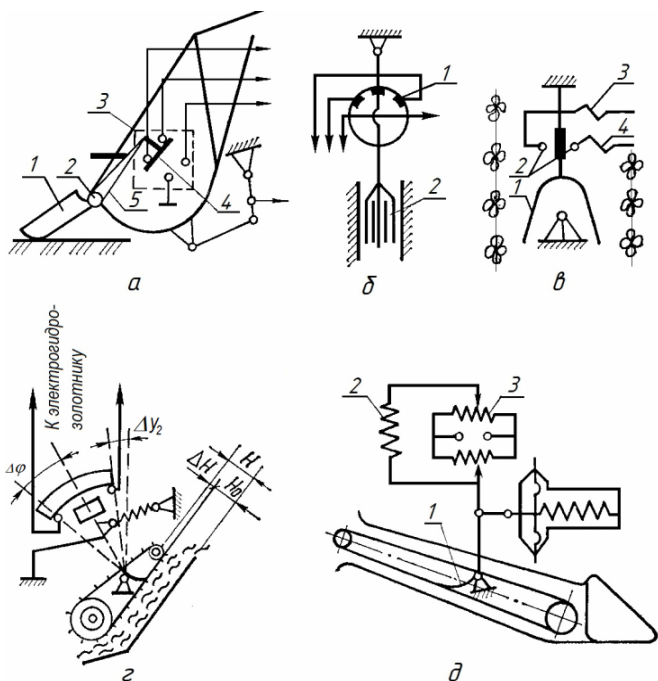


Рис. 4.5. Механические датчики с электроконтактами

Механический чувствительный элемент с электроконтактами (рис. 4.5, *з*) используется в электромеханическом регуляторе толщины слоя растительной массы, поступающей в молотилку зерноуборочного комбайна. Смещение $\Delta\varphi$ подвижного контакта относительно неподвижных пропорционально изменению толщины слоя ΔH и смещению контактной панели Δy_2 :

$$\Delta\varphi = k_2 \Delta y_2 - k_1 \Delta H.$$

Механический чувствительный элемент *1* с электроконтактами (рис. 4.5, *д*), включенными в мостовую схему *3*, используется в релейной системе загрузки молотилки зерноуборочного комбайна. Сигнал от чувствительного элемента *1* преобразуется мостовой схемой *3* в электрический сигнал, управляющий поляризованным реле *2* и электрогидрораспределителем.

4.5. Потенциметрические датчики

Потенциметрические устройства широко используются для преобразования линейного x или углового φ перемещений (входная величина) в электрический сигнал постоянного или переменного тока (выходная величина). Преобразование перемещений в напряжение (или ток) осуществляется в соответствии с требуемыми функциональными зависимостями $U = f(x)$, $U = f(\varphi)$.

Конструктивно потенциметрическое измерительное устройство (рис. 4.6, а) состоит из каркаса 1 (прямого или кругового), обмотки 2 (из константа, манганина, изабелина, никелина) и движка 3. В последнее время находят применение непроволочные (пленочные) потенциометры, в которых функцию обмотки выполняет пленка из благородного металла радия, нанесенная на стекло.

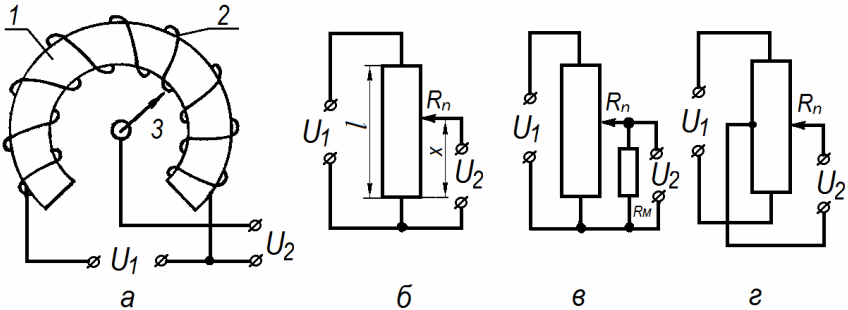


Рис. 4.6. Потенциметрические датчики

Если движок потенциметра связать с каким-либо первичным чувствительным элементом (мембрана, поршень и т. п.), то входной величиной могут быть ускорение, усилие, давление и т. п.

Для устройств согласно схемам на рис. 4.6, а, б напряжение на выходе определяется из выражений:

$$U_2 = IR_\varphi = \frac{U_1}{R_\Pi} R_\varphi = U \frac{\varphi}{\varphi_0} = k\varphi;$$

$$U_2 = IR_x = \frac{U_1}{R_\Pi} R_x = U \frac{x}{l} = k_1 x.$$

Для схемы на рис. 4.6, в зависимость $U_2 = f(x)$ имеет нелинейный характер и только при значениях $R_m \rightarrow \infty$ приобретает линейный характер. Уменьшение нелинейности статической характеристики может быть достигнуто включением датчиков в мостовые схемы.

Для схемы на рис. 4.6, з:

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \frac{x}{l} = \frac{k_1 x}{2}.$$

Применение потенциметрических измерительных устройств в системах сельскохозяйственной автоматики иллюстрирует рис. 4.7.

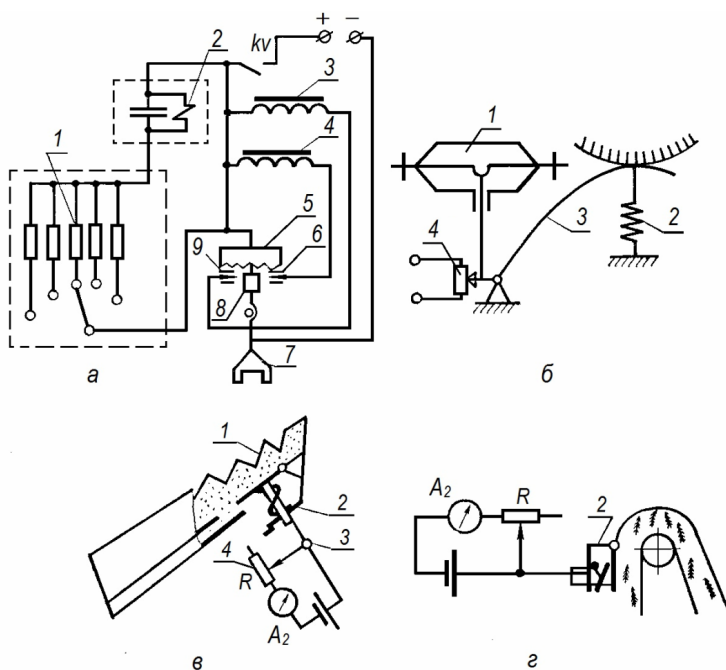


Рис. 4.7. Примеры применения потенциметрических датчиков

В автоматической системе управления тракторным агрегатом (рис. 4.7, а) копирующий шуп 7 нажимным контактом 8 соединяется

с одним из контактов 6 или 9 , замыкающих цепь управляющих соленоидов 3 и 4 . Одновременно замыкается потенциометр 5 и через соответствующее сопротивление блока 1 подается сигнал в цепь импульсного элемента 2 . После зарядки конденсатора срабатывает реле и его контакт KV размыкает цепь соленоида. Тем самым регулируется длительность и амплитуда управляющего сигнала.

Механический контактный щуп 3 (рис. 4.7, б) в системе автовождения комбайна, выполненный в виде флюгер-копира, закрепляется на левом полевом делителе и прижимается к бровке пружиной 2 . Отклонение копира 3 с помощью потенциометра 4 преобразуется в электрический сигнал. Демпфер 1 служит для гашения высокочастотных колебаний копира. Усилие, действующее на копир со стороны бровки несокошенного хлеба, зависит от жесткости растений, от плотности хлебостоя, поэтому при изменении плотности хлебостоя будут выдаваться ложные сигналы.

Известна конструкция потенциометрических преобразователей для определения потерь зерна комбайном (рис. 4.7, в, г). К корпусу одной из клавиш соломотряса на конечном его участке шарнирно прикреплена плоская пластина 1 , которая опирается на пружину 2 и соединяется рычажной передачей 3 с движком реостата 4 . Отклонение пластины и соответствующее перемещение движка реостата зависят от количества находящегося на ней зерна.

Такое же устройство (рис. 4.7, г) размещено в верхней головке колосового элеватора и служит для определения потерь зерна недомолотом.

4.6. Тензометрические датчики

Тензометрирование широко используют для измерения малых перемещений, деформаций деталей. Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта – изменении величины активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений. Основной их характеристикой является коэффициент тензочувствительности K , определяемый как отношение изменения сопротивления $\Delta R / R$ к изменению деформации $\Delta L / L$.

У большинства проволочных тензорезисторов $K \cong 2$, а у полупроводниковых – $K \cong 100$.

Тензорезисторы бывают трех типов (рис. 4.8, *а*, *б*, *в*): проволочные на бумажной (типа 2ПКБ) и пленочной (типа 2ПКП) основе; фольговые прямоугольные (типа 2ФКПА и 2ФКПД), розеточные (типа 2ФКРВ, 2ФКРГ); полупроводниковые (типа КТД, КТДМ, КТЭ, КТЭМ, Ю-8, Ю-12). Номинальный рабочий ток (допустимый) для проволочных тензорезисторов составляет примерно 30 мА, для фольговых – 0,5 А. Максимальная допустимая относительная деформация не превышает 0,3 %.

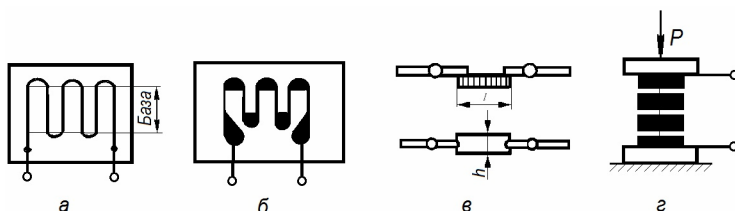


Рис. 4.8. Тензометрические датчики

К числу резисторных преобразователей относятся также угольные преобразователи (рис. 4.8, *з*). Принцип их действия основан на изменении контактного сопротивления R между частицами при изменении усилия P . Характеристика $R = f(P)$ угольного преобразователя не линейна, т. е. он имеет переменную чувствительность. Поэтому выбирают рабочий диапазон с линейным участком характеристики.

При измерениях включают либо по потенциометрической (рис. 4.9, *а*), либо по мостовой (рис. 4.9, *б*) схемам.

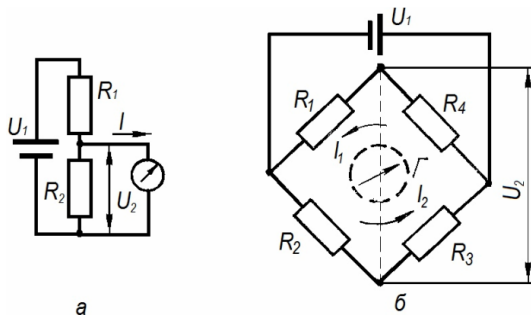


Рис. 4.9. Схемы включения тензометрических датчиков

Тензометрические измерительные устройства широко используют для измерений усилий, давлений, моментов.

4.7. Электромагнитные датчики

Принцип действия электромагнитных преобразователей основан на изменении индуктивности L магнитной системы под воздействием входной величины (перемещения, деформации, уровня, давления и т. п.). По виду преобразования электромагнитные устройства делятся на четыре группы: индуктивные, трансформаторные, магнитоупругие и индукционные.

Индуктивные датчики преобразуют изменения регулируемой величины в изменение индуктивного сопротивления обмотки. Они работают на переменном токе и состоят из катушки индуктивности 3, сердечника 2 и якоря 1 (рис. 4.10, а).

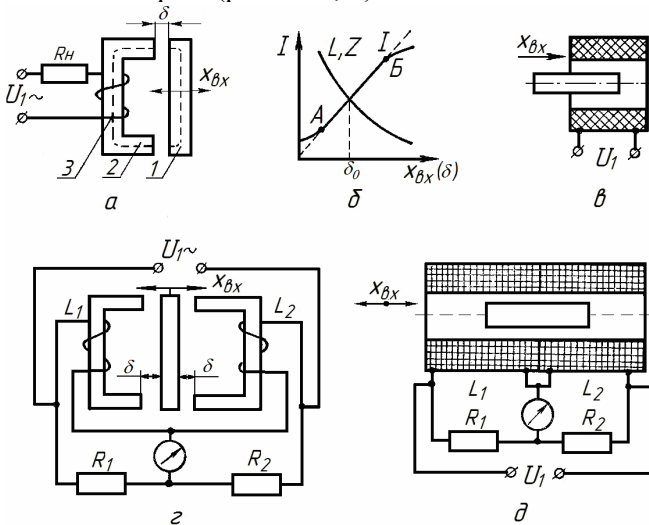


Рис. 4.10. Электромагнитные датчики

При перемещении якоря изменяется воздушный зазор δ , индуктивность катушки и ее полное сопротивление переменному току

$$Z = \sqrt{R_{\text{ок}}^2 + R_L^2}.$$

Чувствительность индуктивного преобразователя обратно пропорциональна начальному зазору, т. е. $S = \frac{\Delta Z / Z}{\Delta \delta / \delta}$. Поэтому индуктивные

устройства особенно чувствительны при малых значениях входной величины и реагируют на ее изменения при 0,1–0,5 мкм. Статическая характеристика индуктивного преобразователя $I = f(\delta)$ (рис. 4.10, б) имеет изгибы в точках А и Б, поэтому величину первоначального зазора δ_0 следует выбирать в середине прямолинейного участка. Для устройства, изображенного на рис. 4.10, а, входное перемещение допускается от 0,01 до 5 мм, а для соленоидного преобразователя (рис. 4.10, в, д) от 3 до 100 мм.

Реверсивная схема включения (дифференциальный преобразователь), изображенная на рис. 4.10, д, з, является совокупностью двух нереверсивных схем при небольших отклонениях якоря. Выходной сигнал (ток, напряжение на нагрузке) в этом случае изменяется практически линейно, т. е. $I = k\delta$.

При переходе якоря через нулевое положение фаза выходного напряжения меняется на 180° .

Трансформаторные датчики являются разновидностью индуктивных. Принцип их действия основан на изменении взаимной индуктивности обмоток при перемещении относительно друг друга или при перемещении якоря датчика.

Трансформаторные датчики являются генераторными и подразделяются на две основные группы в зависимости от способа изменения взаимной индуктивности: а) с перемещающимся или поворотным якорем (рис. 4.11, а, б, в); б) с поворотной (обмотка укреплена на поворотной рамке) или перемещающейся обмоткой (обмотка находится на якоре). Датчики этого типа позволяют получить любое напряжение на выходе нагрузки независимо от величины напряжения источника питания. Во вторичной обмотке W_2 (рис. 4.11, а) датчика индуцируется ЭДС E_2 , величина которой находится в определенной зависимости от величины зазора δ .

При $I = const$:

$$E_2 = w W_2 \Phi = f(\delta),$$

где w – угловая частота,

Φ – магнитный поток.

На рис. 4.11, б приведена схема трехстержневового датчика с поворотным якорем. Первичная обмотка 1 питается от сети переменного тока. Вторичные обмотки 2 и 3 соединены последовательно и встречно. При нейтральном положении якоря магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 равны, и напряжение на выходе равно нулю. Отклонение якоря в ту или другую сторону приводит к изменению магнитного сопротивления цепей потоков Φ_2 и Φ_1 и на выходе появляется напряжение, которое пропорционально отклонению якоря:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k\alpha.$$

Для трансформаторного датчика соленоидного типа (рис. 4.11, в)

$$U_{\text{ВЫХ}} = kU_1 \frac{W_2}{W_1} x_{\text{ВХ}},$$

где $x_{\text{ВХ}} = (0,1 - 0,2)l$.

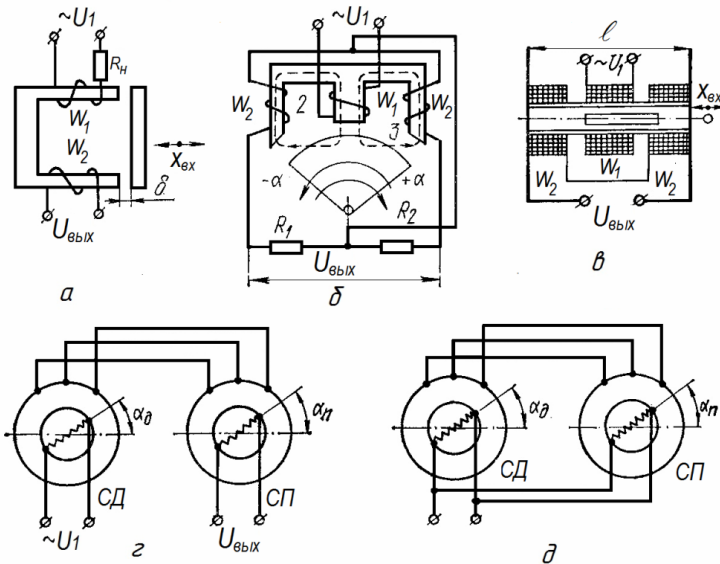


Рис. 4.11. Трансформаторные датчики

Чувствительность трансформаторных преобразователей составляет 0,5–3 мВ/мк на 1 В первичного напряжения.

Для измерения угловых перемещений трансформаторные датчики выполняются часто в виде электрических машин (вращающиеся трансформаторы, сельсины), у которых первичная обмотка располагается на статоре, а вторичная – на роторе. Вращающиеся трансформаторы имеют по две перпендикулярные обмотки на статоре и роторе и приспособлены для работы в режиме синусно-косинусного вращающегося трансформатора и режима линейного вращающегося трансформатора.

Разновидностью вращающихся трансформаторов являются сельсины – специальные индуктивные миниатюрные машины. Контактные и бесконтактные сельсины подразделяют на сельсины-датчики, сельсины-приемники, дифференциальные сельсины и сельсины-трансформаторы. В пазах ротора обычного сельсина уложена одна обмотка возбуждения, а в пазах статора – три обмотки синхронизации, магнитные оси которых сдвинуты на 120° одна относительно другой. У бесконтактных сельсинов обмотка возбуждения и обмотка синхронизации располагаются на статоре. Индуктивная связь между обмотками осуществляется с помощью вращающегося ротора. Сельсины используются в основном в двух режимах: индикаторном (рис. 4.11, *е*) и трансформаторном (рис. 4.11, *д*).

Трансформаторный режим работы применяется при использовании сельсинов в качестве датчиков угла рассогласования следящих систем. В этом режиме выходное напряжение снимается с однофазной обмотки сельсина-приемника и при малых углах рассогласования $U_{\text{вых}} = k_{\text{вх}} = k (\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}})$.

Из этого выражения видно, что сельсины могут быть использованы в трансформаторном режиме как устройства, измеряющие разность угловых перемещений.

В индикаторном режиме работы при повороте ротора сельсина-датчика под влиянием возникающего момента будет поворачиваться и ротор сельсина-приемника. Так как этот момент весьма мал, то индикаторный режим в системах автоматического управления не применяется. При повороте сельсином-приемником указателя какого-либо прибора (с малым моментом нагрузки) ошибка сельсинной передачи угла колеблется от 0,5 до 5° .

В тех случаях, когда необходимо, чтобы угол поворота одного вала равнялся сумме углов поворота нескольких валов, используются дифференциальные сельсины. В роторе и статоре дифференциального сельсина уложено по три обмотки, магнитные оси которых сдвинуты на 120° .

Магнитоупругие датчики (рис. 4.12) конструктивно представляют собой магнитные сердечники той или иной конфигурации с расположенными на них одной или несколькими обмотками.

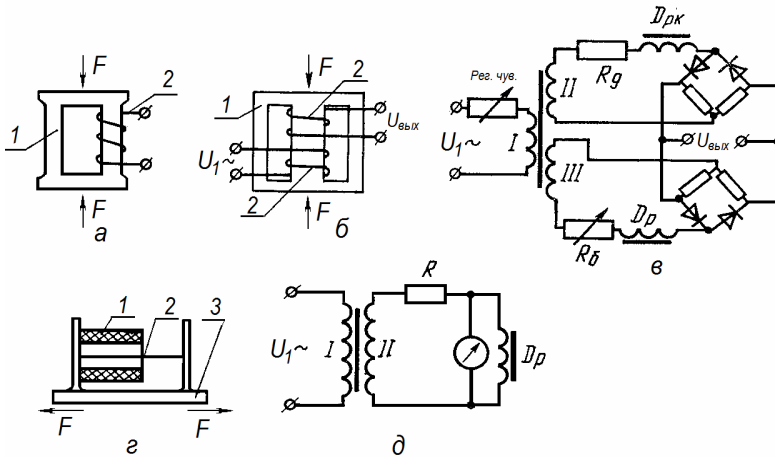


Рис. 4.12. Магнитоупругие датчики

Действие магнитоупругих датчиков основано на изменении магнитной проницаемости ферромагнитных тел, испытывающих воздействие сил или температуры (магнитоупругий эффект).

На этом принципе строятся датчики для измерения усилий или температуры. Под действием нагрузки происходит одновременное изменение магнитной проницаемости и линейных размеров сердечника.

Подобно тензорезисторам для этих датчиков определяют магнитоупругую чувствительность:

$$k = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l} = \frac{E}{\sigma} \frac{\Delta\mu}{\mu},$$

где $\Delta\mu / \mu$ – относительное изменение магнитной проницаемости;
 $\Delta l / l$ – относительная деформация.

Для железоникелевых сплавов типа пермаллой $k \approx 200$ – 300 , несколько ниже эти значения для мягких и кремнистых сталей. Нелинейность характеристики $\mu = f(F)$ ограничивает рабочий диапазон магнитоупругих преобразователей в пределах 15 %–20 % от предела упругости материала. На рис. 4.12, *з* представлен магнитоупругий датчик для измерения деформации с помощью пермаллового провода 2, помещенного внутри соленоида 1 и связанного с деталью 3. Деформация пермаллового провода приводит к изменению индуктивности соленоида.

Недостатком магнитоупругих преобразователей является зависимость магнитной проницаемости от температуры (погрешность составляет несколько процентов), величины тока в катушке, наличие в характеристике управления гистерезиса (погрешность около 1 %) и остаточных деформаций в железоникелевых сплавах.

На рис. 4.12, *б*, *в*, *д* показаны схемы включения магнитоупругих датчиков. Последовательная схема (рис. 4.12, *д*) состоит из последовательно включенных постоянного резистора R и датчика D_p . Недостатком этой схемы является наличие большого начального напряжения, что сужает разрешающую способность измерителя. Для компенсации начального напряжения применяется дифференциальная схема включения (рис. 4.12, *в*), состоящая из двух цепей, в которые включены измерительный дроссель D_p и компенсационный D_{pk} .

Индукционные датчики (рис. 4.13) относятся к типу генераторных. Принцип их действия основывается на явлении электромагнитной индукции – наведения ЭДС в электрическом контуре, в котором меняется магнитный поток. ЭДС E наводится независимо от причины изменения магнитного потока Φ (перемещается ли магнит в неподвижной обмотке или обмотка в постоянном магнитном поле):

$$E = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Индукционные преобразователи подразделяются на два типа: с катушкой, имеющей линейное или угловое перемещение относительно

постоянного магнита (рис. 4.13, а), т. е. $E = k\Phi dx / dt$, и с ферромагнитной деталью, перемещающейся относительно неподвижных магнита и катушки. Для большинства индукционных преобразователей статическая характеристика $E = f(x; \Phi)$ является линейной, погрешности составляют 0,5 %–1,5 %.

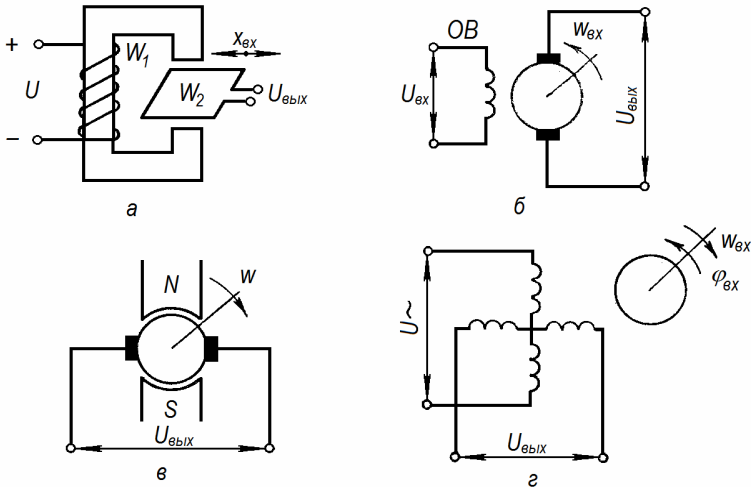


Рис. 4.13. Индукционные датчики

К индукционным датчикам относятся также тахогенераторы постоянного (рис. 4.13, б, в) и переменного тока (рис. 4.13, г), которые представляют собой миниатюрную электрическую машину с независимым возбуждением от магнитов или обмотки возбуждения. Для тахогенератора постоянного тока поток возбуждения Φ остается неизменным, следовательно, высокое напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое со щеток тахогенератора, пропорционально скорости вращения вала. Поэтому тахогенераторы используются для определения угловых скоростей и ускорения.

4.8. Датчик Холла

Датчики магнитного поля в своем большинстве используют эффект Холла, открытый американским физиком Эдвином Холлом

(E. Hall) в 1879 г. Эффект Холла состоит в следующем. Если проводник с током помещен в магнитное поле, то возникает ЭДС, направленная перпендикулярно и току, и полю. Эффект Холла иллюстрируется на рис. 4.14. По тонкой пластине полупроводникового материала протекает ток I . При наличии магнитного поля на движущиеся носители заряда (электроны) действует сила Лоренца. Эта сила искривляет траекторию движения электронов, что приводит к перераспределению объемных зарядов в полупроводниковой пластине. Вследствие этого на краях пластины, параллельных направлению протекания тока, возникает ЭДС, называемая ЭДС Холла.

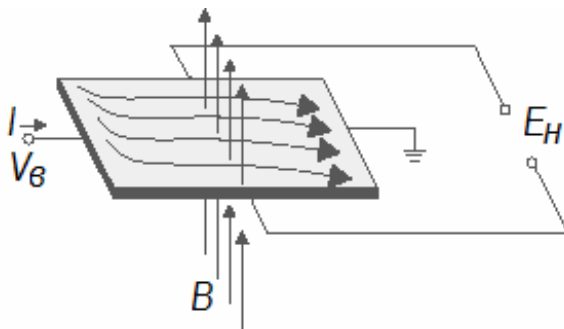


Рис. 4.14. Иллюстрация эффекта Холла

Эта ЭДС пропорциональна векторному произведению индукции B на плотность тока j :

$$E_M = \frac{d}{q_n} [B \times j],$$

где d – ширина пластины;
 q – заряд частицы-носителя;
 n – концентрация носителей.

При снижении концентрации носителей ЭДС Холла возрастает, поэтому в качестве материала для датчиков Холла предпочтительно использование таких полупроводников, как кремний, арсенид галлия и др. Для прямоугольной пластины с однородными током

и магнитным полем, направленными, как показано на рис. 4.14, эта ЭДС равна:

$$E_n = k_n V_s B,$$

где k_n – постоянная Холла,

V_s – напряжение, создаваемое на токоподводящих выводах датчика Холла.

Для кремния k_n составляет величину порядка 70 мВ/(В·Тл), поэтому, как правило, ЭДС датчика Холла требуется усилить.

Датчик Холла (рис. 4.15) применяется в автомобилестроении для определения углового положения газораспределительного механизма в соответствии с положением коленчатого вала двигателя. Информация, поступающая от датчика положения распределительного вала, используется системой управления двигателем для управления впрыском и зажиганием. Функционально датчик связан с датчиком частоты вращения коленчатого вала двигателя.



Рис. 4.15. Датчик Холла

Принцип действия датчика Холла основан на изменении направления движения носителей заряда (изменении напряжения) в полупроводнике при изменении пересекающего его магнитного поля. Магнитное поле создается постоянным магнитом, расположенным в датчике. Изменение магнитного поля происходит при замыкании магнитного зазора репером (металлическим зубом). Репер располагается на зубчатом колесе распределительного вала или на специальном задающем диске, закрепленном на валу.

При прохождении репера мимо датчика в нем возникает импульс напряжения, передаваемый в электронный блок управления. В зависимости от частоты вращения распределительного вала сигнал от датчика Холла поступает в разные промежутки времени. На основании этих сигналов блок управления двигателем распознает положение поршня первого цилиндра в верхней мертвой точке такта сжатия, обеспечивает впрыск бензина и зажигание топливно-воздушной смеси.

На двигателях, оборудованных системой изменения фаз газораспределения, датчик положения распределительного вала используется для управления данной системой. Датчики устанавливаются на распределительных валах впускных и выпускных клапанов.

Несколько иначе датчик Холла работает в системе управления дизельным двигателем. Здесь сигналы датчика используются для установления положения поршня каждого цилиндра двигателя в верхней мертвой точке такта сжатия. За счет этого достигается точное определение положения распределительного вала относительно коленчатого вала, соответственно быстрый пуск дизеля и устойчивая его работа на всех режимах.

Для реализации данных функций внесены конструктивные изменения в задающий диск, на котором установлены реперы для каждого цилиндра двигателя. Это могут быть сегменты разной угловой ширины или набор зубьев, расположенных на разном расстоянии друг от друга. Так, в четырехцилиндровом дизеле на задающем диске устанавливается семь зубьев: четыре основных – по одному на каждый цилиндр под углом 90° и три дополнительных – для распознавания конкретного цилиндра. Дополнительные зубья расположены на разных расстояниях от основных зубьев, чем достигается установление положения поршня в верхней мертвой точке такта сжатия для конкретного цилиндра.

При возникновении неисправности датчика Холла (отсутствии сигнала) система управления двигателем в своей работе использует информацию от датчика частоты вращения коленчатого вала. Двигатель продолжает работать и даже может повторно запускаться после остановки.

4.9. Пьезометрические датчики

Пьезометрические датчики (рис. 4.16) используются в сельскохозяйственной автоматике при измерении усилий, давлений, вибраций, для ориентации машин и в других случаях.

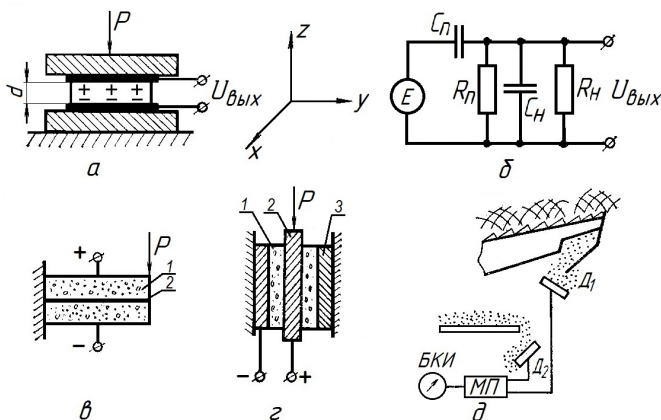


Рис. 4.16. Пьезометрические датчики:

a, б – пьезоэлемент, работающий на сжатие, и его схема включения;
в, з – элементы, работающие на изгиб и сдвиг; *д* – система контроля потерь зерна

В них используется пьезоэлектрический эффект, сущность которого заключается в том, что под действием приложенного усилия на гранях некоторых кристаллов (кварца, титаната бария, турмалина, сегнетовой соли и др.) появляются электрические заряды (прямой пьезоэффект). При внесении пьезоэлемента в электрическое поле он деформируется (обратный пьезоэффект). В пьезоэлементах различают три оси: оптическую Z и перпендикулярные к ней электрическую (пьезоэлектрическую) X и механическую Y . При действии силы P вдоль оси X (сжатие или растяжение), на гранях, перпендикулярных к оси X , возникают разнополярные электрические заряды Q (продольный пьезоэффект). При действии силы вдоль оси Y на тех же гранях также возникают разнополярные электрические заряды (поперечный пьезоэффект). При действии силы вдоль оси Z пьезоэффект отсутствует. Знаки зарядов определяются направлением силы P (растяжение или сжатие).

Количественно пьезоэффект оценивается пьезомодулем k_0 :

$$\text{при продольном пьезоэффекте: } k_0 = \frac{Q_x I P_x}{f_x};$$

$$\text{при поперечном пьезоэффекте: } -k_0 = \frac{f_y Q_y}{f_x P_y}.$$

Пьезоэлемент представляет собой пластину кристалла l с обкладками 2 на гранях f_x (см. рис. 4.16, a). Напряжение между обкладками 2 при отсутствии нагрузки и без учета емкости измерительной схемы (см. рис. 4.16, b):

$$U_{\text{вых}} = \frac{Q_x d}{\varepsilon f_x},$$

где ε – диэлектрическая постоянная материала пластины;
 d – толщина пластины.

Промышленностью освоен выпуск пьезоэлементов на базе кварца и турмалина (ТБ-1, ТБК-3, ТБКС, НБС-1, ЦТС-19, ЦТС-23, ЦТБС-1, ЦТБС-3).

Выпускаются пьезоэлементы, работающие на изгиб (см. рис. 4.16, b) и на сдвиг (см. рис. 4.16, c). Пьезоэлемент, работающий на изгиб, состоит из двух одинаковых, склеенных между собой балок или пластинок l , между которыми находится металлическая фольга 2 .

При соответствующей поляризации элементов можно получить либо сумму напряжений (см. рис. 4.16, b), либо сумму токов. Пьезоэлементы, работающие на сдвиг, выполняют в виде колец l , в которые вклеен внутренний электрод 2 , вклеенных во внешний электрод 3 . При такой конструкции пьезоэлементы обладают малой боковой чувствительностью.

Если приложенная сила P_x постоянна, то с течением времени ($t \rightarrow \infty$) происходит стекание заряда и напряжение на выходе изменяется по экспоненциальному закону. Поэтому пьезоэлектрические элементы применяют в основном для измерения усилий, изменяющихся с частотой выше 15 кГц.

Выходное напряжение их обычно невелико, поэтому в системах автоматики они используются с усилителями.

Пьезометрические датчики применяются в системах контроля потерь зерна (рис. 4.16, d). Датчики предназначены для преобразования кинетической энергии падающих зерен в электрические сигналы и установлены в конце решетки системы очистки, а также во второй и четвертой клавишах соломотряса. Модуль потерь (МП) предназначен для усиления электрических сигналов, поступающих

с датчиков, и формирования импульсов, обеспечивающих работу блока контроля и индикации (БКИ).

4.10. Емкостные датчики

Емкостные датчики (рис. 4.17) представляют собой конденсаторы с изменяющимся зазором d (см) между обкладками, площадью перекрытия пластин F (см²) или диэлектрической проницаемостью ε (нФ/см). Изменение входной величины вызывает изменение емкости конденсатора.

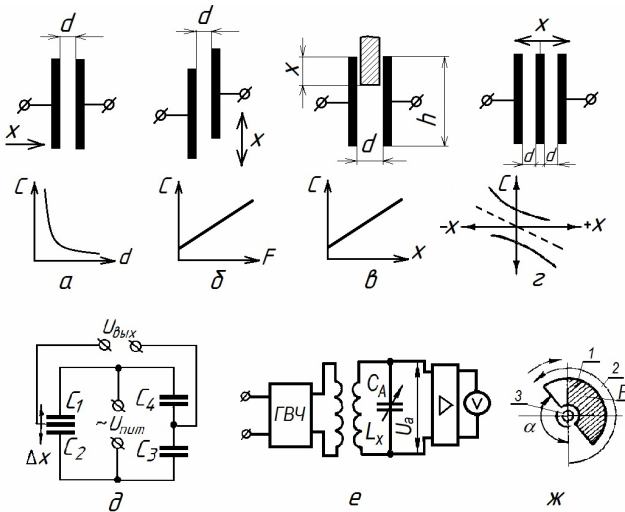


Рис. 4.17. Емкостные датчики

Емкость плоского конденсатора C и его сопротивление R_c определяются формулами:

$$C = 0,088 \frac{\varepsilon F}{d}, \text{ нФ},$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi f C},$$

где f – частота питающей сети.

Емкостные преобразователи с переменным зазором между пластинами (рис. 4.17, *а, б*) служат для измерения линейных перемещений с точностью до 0,1–0,01 мкм; с переменной площадью (рис. 4.17, *жс*) для измерения линейных и угловых перемещений; с изменением диэлектрической проницаемости среды (рис. 4.17, *в*) – для измерения уровней, влажности, температуры, химического состава и пр.

Для повышения точности измерения и чувствительности применяется дифференциальное устройство (рис. 4.17, *з*), емкости которого включены в соседние плечи мостовой схемы (рис. 4.17, *д*). На рис. 4.17, *е* показана резонансная схема включения.

4.11. Фотоэлектрические датчики

Широкое применение при автоматизации различных производственных процессов находят фотоэлектрические устройства, преобразующие световой поток в электрический сигнал. В настоящее время выпускают три вида таких преобразователей: с внешним фотоэффектом (вакуумные или газонаполненные, рис. 4.18, *а*); с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления, рис. 4.18, *б*) и вентильные (полупроводниковые, рис. 4.18, *в*).

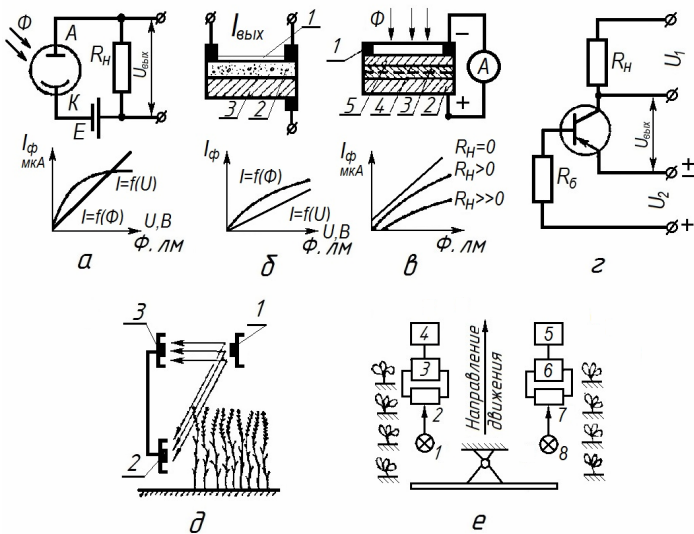


Рис. 4.18. Фотоэлектрические датчики

Основными характеристиками фотоэлементов являются:

– *световая* – зависимость фототока от освещенности $I_{\Phi} = f(\Phi)$ (рис. 4.18);

– *спектральная* – зависимость чувствительности S_{λ} от длины волны λ падающих лучей $S_{\lambda} = f(\lambda)$;

– *вольт-амперная* – зависимость фототока от величины напряжения, поступающего на фотоэлемент $I_{\Phi} = f(U)$;

– *частотная* – зависимость чувствительности от частоты изменения светового потока.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом (рис. 4.18, *а*) представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу, на внутреннюю стенку которой нанесен фоточувствительный слой, являющийся катодом. Под действием светового потока в катоде возникают свободные электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к аноду, создавая внутри фотоэлемента ток (фототок).

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (рис. 4.18, *б*) представляют собой фотосопротивления (фоторезисторы), принцип действия которых состоит в том, что свободные электроны, образующиеся под действием светового потока в слое светочувствительного проводника 3, остаются (перераспределяются) в веществе, резко изменяя его сопротивление. Светочувствительный материал наносится на изоляционную подложку 3 и сверху покрыт защитной тонкой прозрачной лаковой пленкой 1. Наиболее часто применяются сернисто-кадмиевые (ФСК), сернисто-свинцовые (ФСА), сернисто-висмутовые (ФСБ) и селенисто-кадмиевые (ФСД) фоторезисторы.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом (рис. 4.18, *в*) работают на использовании явления, происходящего в переходе $p - n$ под воздействием светового потока. Они состоят из металлического основания 2, выполняющего роль нижнего электрода, слоя полупроводника 3, запирающего слоя 4, полупрозрачного слоя металла 5 и контактного кольца 1.

На рис. 4.18, *д* показан фотоэлектрический преобразователь бровки нескошенного хлеба, применяемый в системах автовождения комбайнов. При движении комбайна бровка находится между источником инфракрасного излучения и приемником 2. Электрический сигнал на выходе приемника 2 пропорционален толщине слоя растений между излучателем и приемником. Выходной сигнал приемника 3, расположенного выше растений, не зависит от смещения бровки и используется для компенсации влияния общей освещенности

в поле на сигнал приемника 2. В качестве приемников 2 и 3 используют фоторезисторы. Недостатком преобразователя является то, что при изменении плотности хлебостоя или его высоты формируются ложные сигналы.

В устройстве обнаружения рядка растений системы автовождения пропашного агрегата (рис. 4.18, е) при отклонении агрегата в сторону поворачиваются жёстко связанные с ним и между собой источники света 1, 8 и фотосопротивления 2, 7. При этом луч света между соответствующим источником и приемником перекрывается растениями рядка и на выходе усилителя 3 или 6 изменяется сигнал, вызывающий срабатывание исполнительного механизма 4 или 5. Такое устройство может быть использовано, когда растения обладают достаточной высотой, чтобы перекрывать луч между источником и приемником, расположенными над почвой.

4.12. Радиотехнические и ультразвуковые датчики

В системах сельскохозяйственной автоматике находят применение бесконтактные радиотехнические и ультразвуковые устройства. Они используются там, где нельзя осуществить непосредственное измерение или контроль измеряемой величины.

На рис. 4.19, а показано бесконтактное радиотехническое устройство для обнаружения растений в начальной стадии их развития.

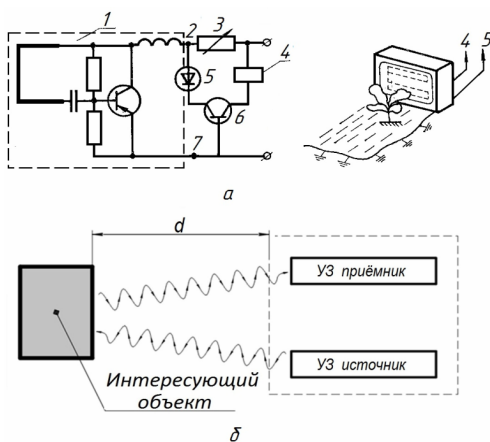


Рис. 4.19. Радиотехнические и ультразвуковые датчики

Воспринимающая часть *1* представляет собой транзисторный автогенератор метровых волн с колебательной системой, помещенный в экран с вырезом в стенке, обращенным в сторону набегающего ряда растений, и располагается вблизи поверхности почвы под углом к оси ряда. При наличии растений вблизи колебательной системы автогенератора изменяется его комплексное сопротивление, что вызывает дополнительные потери высокочастотной энергии, восполняемые источником питания. Вследствие этих изменений внутреннее сопротивление автогенератора увеличивается, напряжение в точках *2* и *7* повышается, что приводит к возрастанию величины тока через измерительный стабилитрон *5*. Ток, протекающий через стабилитрон и вход усилителя *3*, открывает его и вызывает срабатывание исполнительного реле *4*.

В качестве чувствительного элемента к высокочастотному генератору может быть использован емкостный или антенный чувствительный элемент.

В ультразвуковых датчиках реализован принцип радара – фиксируются отраженные от объекта ультразвуковые волны, поэтому структурная схема обычно представлена источником ультразвуковых волн и регистратором (рисунок 4.19, б), которые обычно заключены в компактный корпус. Определение временной задержки между моментами отправки и приема ультразвукового импульса позволяет измерять расстояние до объекта с точностью, доходящей до десятых долей миллиметра. Ультразвуковые датчики на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее универсальным и технологичным бесконтактным средством измерения. Использование этого принципа измерений опять же можно найти в детекторах обнаружения дефектов, только на этот раз уже в ультразвуковых дефектоскопах.

4.13. Датчики температуры

Датчики температуры, применяемые в системах сельскохозяйственной автоматики, подразделяются на тепломеханические (с механическими выходными сигналами) и теплоэлектрические (с электрическими выходными сигналами).

Тепломеханические датчики (термометаллические, дилатометрические) используются в качестве воспринимающих элементов,

преобразующих изменение фактического значения регулируемой температуры в перемещение (рис. 4.20, а).

Термобиметаллический датчик представляет собой узкую пластинку из биметалла, один конец которой закреплен неподвижно. При длине плоской пластинки l , значительно превышающей ее толщину δ , перемещение свободного конца $x_{\text{ВЫХ}}$ при нагревании будет линейно зависеть от температуры $T_{\text{ВХ}}$ окружающей среды:

$$x_{\text{ВЫХ}} = kT_{\text{ВХ}} = k_1 \frac{l^2}{\delta} T_{\text{ВХ}},$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материалов и толщины биметаллической пластинки.

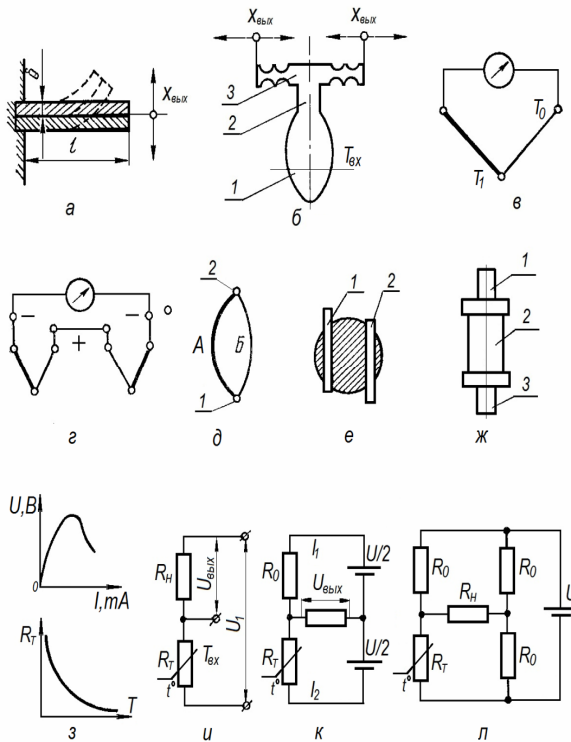


Рис. 4.20. Датчики температуры

Величину $k = k_1 \frac{l^2}{\delta}$ называют чувствительностью термобиметаллического датчика. При толщине пластинки в 1 мм и длине 100 мм свободный конец перемещается на 0,1–0,15 мм на 1 °С изменения температуры.

Термобиметаллические и дилатометрические датчики применяются для измерения температур в диапазоне от -60 до +450 °С. Погрешность преобразования составляет 1 %–5 %.

На рис. 4.20, б показан тепломеханический преобразователь с расширяющейся жидкостью или газом. Изменение температуры $T_{вх}$ металлического баллона 1 связано с изменением давления находящихся в нем жидкости или газа, так как коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов гораздо выше, чем металлов. При изменении давления перемещается свободный конец мембраны 3, связанный с баллоном через капилляр 2. В качестве термометрических жидкостей применяются амиловый спирт, ацетон, ртуть. Погрешности жидкостных преобразователей составляют 1 %–3 %.

В качестве газовых наполнителей применяют азот, гелий и др. Для азота нижний предел измерения составляет -195 °С, для гелия -269 °С, а верхний предел ограничивается теплостойкостью баллона.

Теплоэлектрические датчики – металлические и полупроводниковые терморезисторы (рис. 4.20, е, ж), термопары (рис. 4.20, в, з, д), полупроводниковые диоды и триоды преобразуют изменение фактического значения регулируемой температуры и изменение электрического сопротивления, напряжения или тока.

Металлические терморезисторы изготавливают из чистых металлов (платины, меди, никеля, вольфрама), зависимость сопротивления которых от температуры может быть с весьма высокой точностью описана уравнениями третьей степени. Однако при обычных требованиях к точности ограничиваются квадратной или линейной зависимостью:

$$R_t = R_0(1 + \alpha_m T),$$

где R_0 – величина сопротивления проводника при 0 °С;

α – температурный коэффициент электрического сопротивления.

Чувствительный элемент металлического терморезистора помещается в стальной или латунный корпус с клеммной головкой и представляет собой обмотку из проволоки диаметром 0,04–0,08 мм, размещенную на изолированном корпусе, к концам которой припаиваются выводы из серебряной, а при температуре до 100 °С – из медной проволоки.

Чувствительность проволочных терморезисторов характеризуется температурным коэффициентом сопротивления:

$$K_{TC} = \frac{dR_T}{dT} = \alpha_{TC} R_0.$$

Из металлических терморезисторов наибольшее распространение получили термометры сопротивления типа ТСП (платиновые) и ТСМ (медные).

К числу достоинств следует отнести высокую степень точности измерения (они позволяют измерять температуру с точностью до 0,001 °С), возможность выпуска измерительных приборов к ним со стандартной градуировкой шкалы, возможность использования их с информационно-вычислительными машинами.

Основными недостатками являются: большие размеры, не позволяющие использовать их для измерения температуры в малых объемах, значительная инерционность (постоянная времени до нескольких минут), необходимость в постороннем источнике питания и учете сопротивления подводящих проводов.

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы, позисторы) конструктивно оформляются шариковой (рис. 4.20, е), трубчатой (рис.4.20, ж) и другими формами. Характеристика управления термистора подчиняется убывающему экспоненциальному закону (рис. 4.20, з), а вольт-амперная $U = f(I)$ имеет при определенном токе максимум.

Нелинейность характеристик ограничивает применение термисторов при измерениях температуры в узких пределах. Большой разброс по номинальному сопротивлению затрудняет их взаимозаменяемость.

Отечественной промышленностью выпускаются медно-марганцевые (ММТ), кобальто-марганцевые (КМТ), косвенного по-

догрева (ТКП) и другие термисторы для температур от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чувствительность термисторов в 5–30 раз выше чувствительности металлических терморезисторов. Для позисторов в области плюсовых температур сопротивление резко возрастает с увеличением температуры до предельного ее значения, а затем резко падает. В области отрицательных температур сопротивление позистора с увеличением температуры уменьшается.

Терморезисторы могут включаться в простейшие нереверсивные (рис. 4.20, *и*), дифференциальные (рис. 4.20, *к*) и мостовые (рис. 4.20, *л*) схемы.

Термопары (рис. 4.20, *в*, *з*, *д*) представляют собой спай из двух разнородных металлических проводников А и Б или полупроводников. Если спаи 1 и 2 поместить в среды с разными температурами T_1 и T_0 (горячий и холодный спай), то в контуре этих проводников возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС).

Термопары применяются в системах автоматического регулирования и контроля в диапазоне температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температуре холодного спаи T_0 , равной нулю, величина термо-ЭДС:

$$E \approx aT_1 + bT_1^2 + cT_1^3,$$

где a , b , c – постоянные коэффициенты материалов термопары.

Чувствительность термопары обычно невелика и составляет для разных термопар 0,01–0,07 мВ/1 $^{\circ}\text{C}$. Поэтому для увеличения выходного сигнала применяют последовательное соединение нескольких термопар (рис. 4.20, *з*). Погрешности от нелинейности характеристик термопар достигают 5 %.

4.14. Гидравлические и пневматические датчики

Гидравлические и пневматические датчики преобразуют контролируемые и регулируемые величины различной физической природы в гидравлические и пневматические сигналы. Они состоят из гидравлических или пневматических измерительных устройств и преобразователей.

В качестве чувствительных органов в этих датчиках используют эластичные и упругие мембраны, сильфоны, трубчатые пружины, поплавки, термометрические баллоны, диафрагмы.

На рис. 4.21, *а* показан чувствительный элемент с упругой круглой мембраной 2 (резина, сталь), которая под воздействием давления P прогибается, заставляя шток 1 смещаться на величину, пропорциональную приложенному давлению. Такие мембраны могут измерять давление от 10^4 до 10^8 Па.

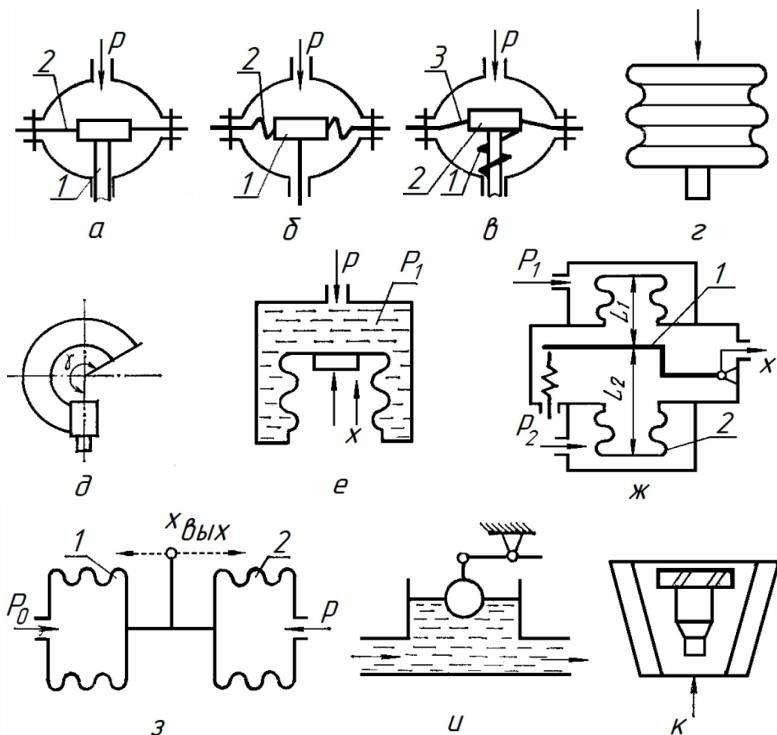


Рис. 4.21. Гидравлические и пневматические датчики

Чувствительный элемент с гофрированной мембраной 2 (рис. 4.21, *б*) служит для измерения давления от 1 до 10^6 Па. Гофрировка увеличивает чувствительность и ход штока 1, который может достигать нескольких миллиметров.

На рис. 4.21, *в* изображен чувствительный (релейный) элемент с хлопающей мембраной 3. Мембрана имеет вид купола из материала с высоким пределом упругости. С увеличением давления до какого-то

максимального значения мембрана практически не прогибается. При давлении $p > p_{\text{макс}}$ мембрана достаточно быстро меняет свой прогиб на противоположный. При уменьшении давления ниже $p_{\text{макс}}$ под воздействием пружины I мембрана также скачкообразно восстанавливает свое исходное положение и форму.

Сильфонный упругий чувствительный элемент (рис. 4.21, *з*) представляет собой гофрированную трубку, имеет перемещения до нескольких сантиметров и используется в широком диапазоне давлений (от 10^{-1} до 10^5 кПа). Сильфон обычно устанавливают так, чтобы он работал на сжатие. При этом он выдерживает большое давление и имеет меньшую нелинейность характеристики, чем при растяжении.

На рис. 4.21, *д* показан трубчатый упругий элемент (пружина Бурдона), запаянный с одного конца и изогнутый в форме незамкнутого кольца. Сечение трубки чаще всего бывает овальным или эллипсным. Для увеличения хода свободного конца трубки применяют винтовые трубки.

На рис. 4.21, *е* показан чувствительный элемент с гармониковой мембраной, а на рис. 4.21, *ж, з* – дифференциальная и компенсационная измерительные схемы с сильфонными элементами. На рис. 4.21, *и, к* показаны поплавковые чувствительные элементы, применяемые для контроля уровня или расхода жидкости и газа. Поплавковые элементы представляют собой, как правило, полое тело, плавающее на поверхности жидкости и повторяющее все изменения ее уровня.

При изменении расхода жидкости или газа поплавков перемещается вверх потоком, протекающим снизу вверх по конусообразному трубопроводу. Каждому значению расхода соответствует одно устойчивое положение поплавка в трубопроводе. Косые прорезы на поверхности поплавка способствуют его вращению. Такое устройство называют ротаметром. Погрешность ротаметров составляет 2 %–2,5 %.

Гидравлические и пневматические преобразователи преобразуют контролируемую величину (скорость течения, расход и др.) в давление или расход жидкости или газа, входят в состав измерительно-преобразующих устройств и по принципу действия могут быть золотниковыми, струйными или дроссельными.

Золотниковый преобразователь (рис. 4.22, а) представляет собой втулку 1 с окнами, в которой перемещается плунжер 2 с поясками 7. Различают золотники с нулевым ($\Delta = 0$), положительным (отсечение, $\Delta > 0$) и отрицательным (проточные, $\Delta < 0$) перекрытиями. При нейтральном положении ($x_{вх} = 0$) жидкость под давлением от насоса поступает через щель 4 в полости I и II в одинаковых количествах и через щели 3 и 5 на слив. Равенство расходов и перепадов давления во всех щелях обеспечивает одинаковые давления в камерах I и II и отсутствие расхода через исполнительный механизм.

Статические характеристики золотниковых преобразователей в общем случае не линейны и зависят от величины Δ и гидравлического сопротивления золотника.

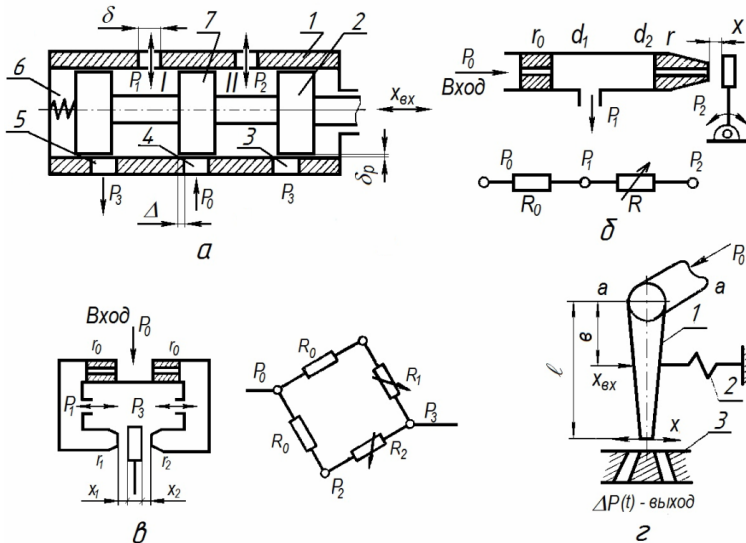


Рис. 4.22. Гидравлические и пневматические преобразователи

Для золотников с $\Delta = 0$ линейность характеристик сохраняется лишь в определенных пределах величины смещения x . Для золотников с $\Delta > 0$ управление становится существенно нелинейным. Однако эти золотники устраняют бесполезный расход рабочей жидкости при нейтральном положении плунжера.

Механопневматические золотниковые распределители по конструкции и принципу действия практически не отличаются от гидравлических.

Преобразователи типа сопло–заслонка (рис. 4.22, б, в) состоят из двух дросселей, один из которых представляет собой регулируемый щелевой дроссель с соплом диаметром d_2 и заслонкой, другой – нерегулируемый дроссель диаметром d_1 и междроссельной камерой, давление в которой зависит от положения заслонки.

При полном перекрытии дросселя заслонкой ($x = 0$) давление p_1 в междроссельной камере определяется расходом жидкости через исполнительный механизм. По мере увеличения расстояния x расход Q через регулируемый дроссель возрастает, а давление в междроссельной камере уменьшается за счет увеличения перепада давлений на нерегулируемом дросселе R_0 .

Характеристика $Q = f(x)$ в общем случае не линейна. Поэтому надо стремиться выбирать рабочую точку на линейном участке характеристики, которой соответствует начальный зазор x_0 между соплом и заслонкой. Обычно $x_0 = 0,5x$.

Если в качестве рабочей жидкости применяются минеральные масла, то $0 < x < (0,1 \dots 0,08)d_2$, а в пневматических устройствах $0 < x < 0,25d_2$.

Преобразователи типа сопло–заслонка имеют недостаток – в исходном положении бесполезно расходуют жидкость. При этом вырывающийся из сопла поток стремится отбросить заслонку, поэтому удержать ее в исходном положении способны лишь сравнительно мощные управляющие устройства.

С целью реверсивного управления, увеличения крутизны статической характеристики и уменьшения силового воздействия струй на заслонку применяют дифференциальные преобразователи (рис. 4.22, в). На этом же рисунке показаны аналоги преобразователей типа сопло–заслонка. Преобразователи с соплом и заслонкой обладают высокой чувствительностью к малым перемещениям заслонки.

Преобразователи со струйной трубкой (рис. 4.22, г) состоят из струйной трубки 1, способной поворачиваться вокруг оси, и силовой приемной головки 2 с двумя близко расположенными приемными соплами. В нейтральном положении, когда трубки расположены точно посередине между приемными соплами, жидкость, поступающая в нее от насоса, ускоряясь в конической насадке

и формируясь в компактную струю, обладающую большой кинетической энергией, ударяет в приемные сопла, перекрывая одинаковые площади в каждом из них. Кинетическая энергия струи переходит в потенциальную энергию давления. При небольшом смещении трубки в ту или иную сторону под воздействием чувствительного элемента давление в одном из сопел увеличивается, а в другом падает, что вызывает соответствующее смещение исполнительного механизма.

К недостаткам струйного преобразователя относятся малое быстродействие, холостой расход жидкости при нейтральном положении трубки.

4.15. Задающие устройства

Задающее устройство САР формирует и хранит величину воздействия, переменные величины, уставки, коэффициенты, метки времени и т.п. Задающее устройство вырабатывает условия протекания технологического процесса $Y_3(t)$ – функцию времени. Эта функция может быть одномерной (одна величина) или многомерной (несколько величин). В системах автоматического управления чаще встречаются многомерные функции времени, когда задаются условия одновременно по нескольким параметрам – температуре, давлению и т.д.

Задающие устройства выдают сигнал в аналоговой или цифровой форме.

В качестве задающего устройства ранее применялись кулачковые механизмы, функциональные потенциометры, перфокарты, магнитные пленки и кинопленки и т. п. В настоящее время используются электронные аналоговые и цифровые устройства.

На рис. 4.23 приведены некоторые типы задающих устройств – задатчиков постоянных аналоговых и цифровых величин. Существует достаточно широкий класс потенциометрических задающих устройств, в основе которых лежит уставка величины с помощью потенциометра R (рис. 4.23, *a*). На переменный резистор R подается опорное напряжение $U_{оп}$.

Постоянный сигнал Y_3 задается и запоминается положением движка потенциометра R . Например, при необходимости задать величину «1» положение движка устанавливают таким образом,

что $Y_3 = 1$ В, величину «1,4» – $Y_3 = 1,4$ В и т. д. Для этого к движку подсоединяют измерительный прибор Π , проградуированный в единицах задаваемой величины, например, температуры. Иногда уставки имеют постоянные величины – их задают с помощью дискретного потенциометра, имеющего переключатель резисторов P_k (рис. 4.23, б). Положение переключателя 1-е, 2-е и т. д. также градуируется в единицах задаваемой величины.

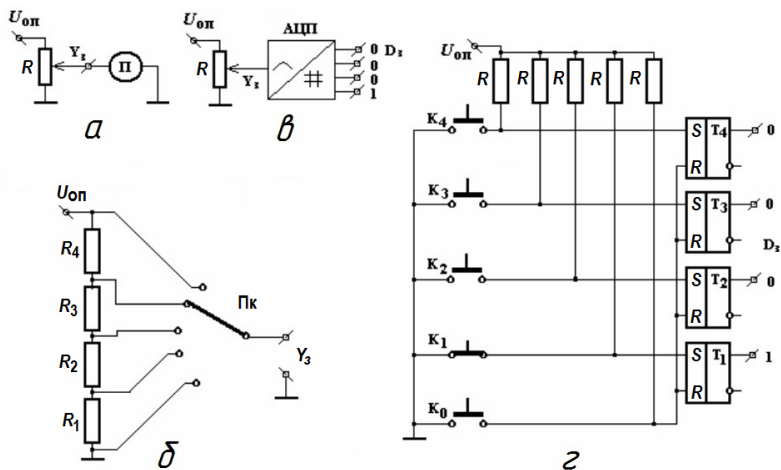


Рис. 4.23. Аналоговые и цифровые задающие устройства:

- а – аналоговое потенциометрическое; б – дискретное потенциометрическое;
- в – цифровое потенциометрическое; г – цифровое

При исчезновении внешнего напряжения заданная величина остается введенной и вновь подается в САУ при его появлении.

При необходимости использования задаваемой величины в цифровом виде потенциометрический задатчик снабжается аналого-цифровым преобразователем АЦП (рис. 4.23, б). На его выходе имеется цифровой код D_3 задаваемой величины Y_3 .

Запоминание заданной величины осуществляется за счет неизменного положения движка потенциометра или переключателя.

Для управления цифровыми системами на базе микропроцессоров и компьютеров используются кнопочные задатчики. На рис. 4.23, г приведена схема дискретного четырехразрядного задатчика сигнала.

Он состоит из кнопок ввода $K_1 - K_4$, кнопки сброса K_0 и триггеров памяти $T_1 - T_4$. Если кнопки $K_1 - K_5$ отжаты, не соединяют общую шину со входами триггеров $T_1 - T_4$, то на S – выходах последних имеются логические «0». Логический «0» триггеров устанавливается путем нажатия кнопки K_0 .

Для ввода цифрового кода нажимаются кнопки $K_1 - K_4$. Например, для ввода «1» нажимается K_1 . Триггер T_1 перекидывается, и на его S -выходе появляется логическая «1», которая запоминается, несмотря на то, что кнопка K_1 отпускается. Далее можно вводить другие цифры, например, «2», нажимая на соответствующие кнопки – K_2 и т. д. В результате на выходе триггеров появляется цифровой позиционный код вводимой величины, который используется далее САУ для получения управляющего сигнала. Цифровой код сохраняется до нажатия кнопки K_0 или снятия напряжения со схемы. Последнее обстоятельство является недостатком описанной схемы. Для его устранения используют специальные источники питания – аккумуляторы или постоянные запоминающие устройства.

Для получения функциональных зависимостей используют возможности микропроцессоров к хранению и выполнению сдвиговых и математических операций. Функциональные зависимости в микропроцессорном устройстве генерируются с помощью специальной рабочей программы, записываемой в его память.

4.16. Сравнивающие устройства

Сравнивающие устройства в наиболее распространенном случае измеряют разность $x(t) = g(t) - y(t)$, пропорциональную отклонению управляемой величины $y(t)$ от ее заданного значения $g(t)$. На рис. 4.24 приведены некоторые наиболее распространенные в сельскохозяйственной автоматике сравнивающие устройства.

Например, сравнивающее рычажное устройство (рис. 4.24, *e*) выполняет функцию сложения (вычитания) двух сигналов. Оно состоит из стержней 1, 3, 4 и рычага 2. При перемещении стержня 1 на величину $S_{вх1}$, а стержня 3 на величину $S_{вх2}$ стержень 4 переместится на величину $S_{вых}$.

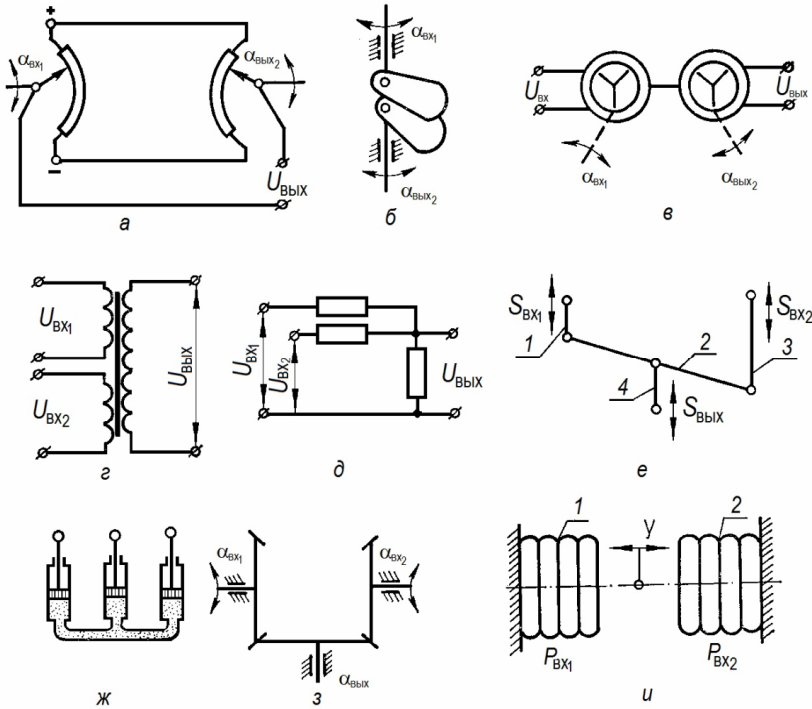


Рис. 4.24. Сравнивающие устройства

Из плана перемещений можно определить:

$$S_{\text{ВЫХ}} = S_{\text{ВХ1}} \frac{l_2}{l_1 + l_2} + S_{\text{ВХ2}} \frac{l_1}{l_1 + l_2}.$$

В механических суммирующих устройствах выполняется алгебраическое суммирование усилий или перемещений, при этом выходной величиной суммирующих устройств является перемещение.

В ряде случаев задача суммирования выполняется настолько просто, что специальное суммирующее устройство отсутствует. Примером может служить простейшее суммирующее (вычитающее) устройство, показанное на рис. 4.24, ж.

Эти схемы часто используются для сравнения двух сопротивлений в реверсивных схемах усилителей.

4.17. Усилительные устройства

Усилителем называется устройство, в котором происходит усиление выходного сигнала датчика или сигнала, прошедшего через преобразовательный элемент до значений, при которых они достаточны для питания исполнительных элементов за счет энергии дополнительного источника. В усилителях входная и выходная величины имеют одинаковую физическую природу. Усилитель может быть выполнен как самостоятельный элемент автоматической системы или входит в состав датчика или исполнительного механизма.

По виду используемой энергии усилители подразделяются на гидравлические, пневматические, электрические, механические, а по виду статических характеристик – на линейные, нелинейные (нелинейность обусловлена зоной нечувствительности) и релейные.

Основными характеристиками усилителя являются: коэффициент усиления, чувствительность, быстродействие, точность воспроизведения на выходе изменений входной величины, линейность.

Выбор и расчет усилительных устройств автоматической системы производится после выбора первичных преобразователей и исполнительных устройств.

Гидравлические и пневматические усилители. Основной принцип действия гидравлических и пневматических усилителей – управление с помощью механического перемещения каких-либо элементов потоком жидкости или газа. С точки зрения герметизации питающей системы гидравлические усилители уступают пневматическим, в которых используются маломощные системы для привода и не требуется компенсация гидродинамических усилий.

Широкое применение находят дроссельные и струйные усилители. Среди дроссельных усилителей наиболее распространены золотниковые и типа сопло-заслонка.

Золотниковые усилители. Основной частью усилителя является золотниковая пара, состоящая из втулки (цилиндра) со щелями, внутри которой перемещается золотник. В зависимости от назначения применяют одно-, двух- и четырехщелевые золотниковые пары, изготовленные с высокой точностью (поле допуска не превышает нескольких микрон).

В пневматических усилителях золотниковые пары работают без смазки при малом зазоре между золотником и втулкой. Это требует высокой точности изготовления и качества применяемых материалов. Гидравлические сопротивления окон золотниковых пар определяют по экспериментальным расходным характеристикам $Q = f(\delta)$ при $\Delta p = const$, где Δp – перепад давления на щели, Q – расход, δ – зазор между золотником и втулкой.

Диаметр золотника $d_{зол}$ определяется в зависимости от расхода жидкости Q при постоянном давлении p_0 в магистрали.

На рис. 4.25, а приведена схема гидравлического поршневого усилителя с золотниковым управлением. В исходном положении под воздействием пружин 1, 3 полностью перекрыты соединительные каналы между золотниковым 2 и силовым 6 цилиндрами. При перемещении x (например, влево) штока 7 золотника открываются каналы 4, и жидкость под давлением p_0 поступает в левую полость силового цилиндра 6 и вытесняется из правой его части.

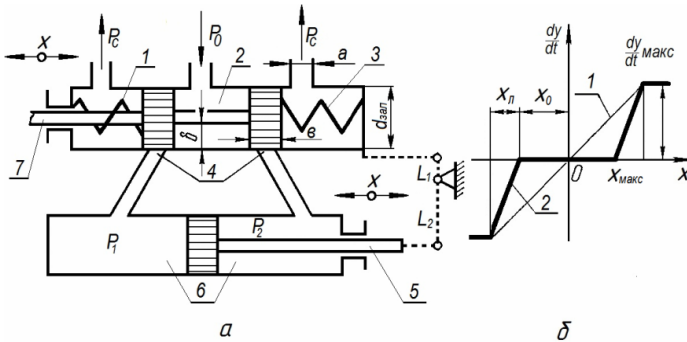


Рис. 4.25. Схема гидравлического поршневого усилителя

При этом давление p_1 превысит давление p_2 , и шток 5 силового цилиндра будет перемещаться вправо. При изменении направления движения золотника изменяется также направление перемещения поршня силового цилиндра.

Статическая скоростная характеристика этого усилителя нелинейная (рис. 4.25, б). Наличие зоны нечувствительности $2x_0$ объясняется тем, что в исходном положении золотник перекрывает входное ($b > a$) отверстие, т. е. используется отсечной золотник. Для устранения зоны нечувствительности применяют проточные

золотники, обеспечивающие дополнительный небольшой расход жидкости, что позволяет использовать усилители при низких температурах.

Тогда скоростная характеристика в рабочей части может быть аппроксимирована прямой (линия 1 на рис. 4.25, б).

Усиление обеспечивается вспомогательной энергией жидкости, нагнетаемой насосом и стабилизируемой по давлению гидросопротивлением.

Для того чтобы движение поршня силового цилиндра точнее повторяло входное перемещение золотника, используют жесткую обратную связь в виде рычага длиной $L_1 + L_2$, концы которого соединены с золотниковым цилиндром и штоком поршня силового цилиндра (штриховая линия на рис. 4.25, а). В отличие от рассматриваемой выше схемы золотниковый цилиндр подвижный. Входное перемещение штока золотника будет вызывать движение поршня силового цилиндра и цилиндра золотника до тех пор, пока отверстия не будут перекрыты.

Коэффициент усиления k достигает 10^3-10^4 .

Усилитель типа сопло-заслонка (рис. 4.26, а) состоит из дросселя 4 с постоянным гидравлическим сопротивлением, заслонки 1 и силового цилиндра 3.

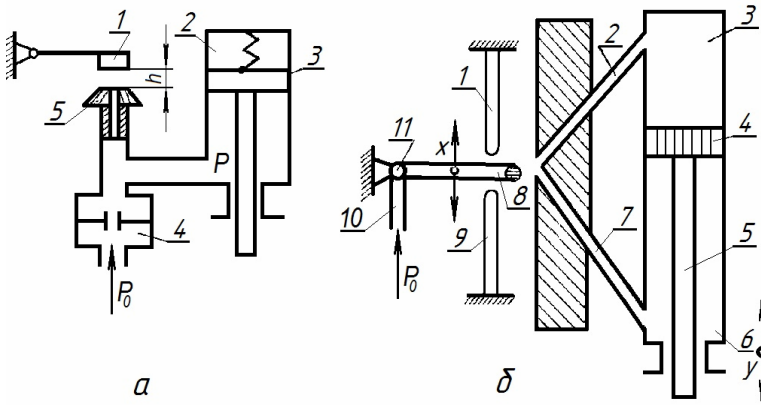


Рис. 4.26. Усилитель типа сопло-заслонка

Рабочая жидкость под постоянным давлением подается в усилитель через дроссель 4. В зависимости от положения заслонки 1

между дросселями 4, 5 устанавливается давление p , которое передается под поршень 3 и заставляет его перемещаться до тех пор, пока не установится новое равновесие между силой упругости пружины 2 и силой, приложенной к поршню 3. При изменении h изменяется расход рабочей жидкости через сопло 5, вследствие чего изменяется давление p этой жидкости, воздействующей на перемещение поршня 3, и поршень перемещается в ту или другую сторону. Подбор профиля заслонки позволяет получить линейную зависимость между положением заслонки и давлением p .

Конструктивное исполнение усилителей типа сопло-заслонка может быть весьма различно. Наиболее часто применяют дифференциальные схемы, обладающие большой чувствительностью и усилением. Коэффициент усиления их достигает 10^6 .

Схема гидравлического усилителя со струйной трубкой приведена на рис. 4.26, б. Скоростной напор жидкости, вытекающей из мундштука 8 струйной трубки 10, превращается при ее отклонении от среднего положения в переменное давление рабочей жидкости в отходящих от сопла трубках 2, 7. Струйная трубка 10 вращается около полой цапфы 11, в которую подается рабочая жидкость (масло) под давлением p_0 . Вытекающая из мундштука 8 струя жидкости попадает в оба канала приемного сопла, где скоростной напор превращается в давление, передаваемое через жидкость в полости 3, 5 сервомотора. При среднем положении струйной трубки 10 струя масла развивает одинаковое давление в приёмных соплах 2, 7 и в связанных с ними полостях 3, 5 сервомотора, и поршень 4 остается неподвижным. При отклонении струйной трубки 10 от среднего положения давление в одном из сопел, в сторону которого отклонилась трубка, увеличивается, а в другом падает. Появляется разность давлений в полостях сервомотора, и его поршень 4 начинает двигаться, перемещая шток 5 и связанный с ним регулирующий орган в определенном направлении. Разность давлений, а следовательно, и скорость движения поршня, пропорциональны отклонению струйной трубки от своего среднего положения. Это отклонение, в свою очередь, пропорционально изменению регулируемой величины. Следовательно, скорость перемещения регулирующего органа приблизительно пропорциональна отклонению регулируемой величины от своего заданного значения. При значительном отклонении струйной трубки (до ограничителя) скорость перемещения регулирующего органа становится постоянной.

Расход масла через струйную трубку составляет 300–500 л/ч. Максимальное отклонение конца струйной трубки в пределах, определяемых ограничителями 1, 9, составляет 1–2 мм. Коэффициент усиления гидроусилителей со струйной трубкой достигает 10^4 .

Гидроусилители изготавливаются без обратной связи и с жесткой обратной связью по положению поршня гидравлического исполнительного механизма.

Рассмотренные схемы гидроусилителей являются однокаскадными, существуют и многокаскадные схемы, где исполнительный орган предыдущего усилителя воздействует на управляющий орган последнего. Выходная мощность гидроусилителей составляет 1–200 кВт.

Магнитные усилители. Магнитные усилители относятся к параметрическим усилителям, принцип действия которых основан на использовании нелинейных характеристик кривой намагничивания ферромагнитных материалов (μ – магнитная проницаемость > 1). Они обладают высоким коэффициентом усиления по мощности и току, надежно работают при повышенной влажности, при вибрации, при высокой и низкой температурах, нечувствительны к качеству электрической энергии, отличаются простотой суммирования нескольких сигналов, высоким коэффициентом полезного действия.

Магнитный усилитель (рис. 4.27, а) представляет собой два одинаковых трансформатора с замкнутыми ферромагнитными сердечниками, которые подмагничиваются постоянным током. Вторичные обмотки трансформаторов включаются последовательно с нагрузкой R_H в сеть переменного напряжения $U_{\text{ввых}}$. Первичные обмотки W_1 называются управляющими и соединены последовательно и встречно, чтобы в них не индуцировался переменный ток.

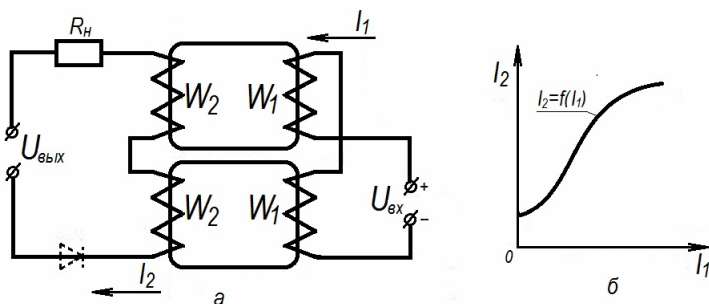


Рис. 4.27. Магнитный усилитель

Входной величиной усилителя является ток в обмотке W_1 , выходной переменный ток в обмотках W_2 и в нагрузочном сопротивлении R_n .

При увеличении постоянного тока насыщение сердечников увеличивается, а индуктивное сопротивление уменьшается, в результате чего сила тока в выходной цепи возрастает (рис. 4.27, б).

Коэффициент усиления по току:

$$k = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_2}{I_1},$$

по мощности:

$$k_1 = \frac{N}{N_n} \approx \frac{50}{200},$$

где N – мощность на выходе;

N_n – мощность на подмагничивание сердечников.

Как видим, затрачивая небольшую мощность на подмагничивание сердечника, можно управлять значительной мощностью на выходе.

Чтобы снизить наведенный переменный ток в управляющей обмотке (помимо встречного соединения обмоток W_1), в цепь этих обмоток включают дроссель, резко снижающий наведенный переменный ток.

Если вторичные обмотки W_2 включить в сеть переменного напряжения, то по сердечникам трансформаторов будут проходить магнитные потоки, величина которых определяется намагничивающей силой вторичной обмотки $\Phi = I_0' W_2$ (I_0' – ток холостого хода, т. е. ток при разомкнутых первичных обмотках).

Если замкнуть первичные обмотки на какой-либо прибор или накоротко, то по этим обмоткам ток протекать не будет и, следовательно, не изменится величина тока во вторичных обмотках. Но если в первичные обмотки подать постоянный ток, то он вызовет уменьшение действующей магнитной проницаемости, так как увеличится напряженность магнитного поля. С уменьшением магнитной проницаемости будут уменьшаться индуктивность L вторичных

обмоток и реактивное сопротивление этих обмоток, что приведет к увеличению тока во вторичных обмотках.

Нагрузка R_n в цепи управляемой обмотки является выходом усилителя.

Магнитные усилители могут быть с обратной связью и без нее. Усилители без обратной связи применяются для усиления мощностей более 20–50 Вт. С увеличением мощности магнитного усилителя возрастает постоянная времени обмоток управления и, следовательно, уменьшается быстродействие.

Магнитные усилители несмотря на их инерционность в автоматике используются в качестве дросселей насыщения или управляемой индуктивности усилителей-преобразователей сигналов постоянного тока в переменный, магнитных модуляторов, усилителей мощности для управления двигателями переменного тока, бесконтактных магнитных реле, регуляторов напряжения, частоты и температуры.

Электромашиным усилителем (ЭМУ) называется усилитель, работа которого основана на эффекте усиления электрического сигнала в генераторах за счет механической энергии приводного двигателя. Он представляет собой машину постоянного тока, в которой механическая энергия приводного двигателя преобразуется в энергию выходного сигнала (электрического). ЭМУ нашли широкое применение в системах автоматического регулирования электроприводами (особенно в подъемно-транспортных машинах), в следящих электроприводах.

ЭМУ бывают с независимым возбуждением (независимые) (рис. 4.28, а) и с самовозбуждением с поперечным и продольным полем.

ЭМУ с независимым возбуждением состоит из электродвигателя Д (обычно с короткозамкнутым ротором) и генератора постоянного тока Г.

При подаче на обмотку статора генератора $U_{вх}$ (управляющая обмотка) на нагрузке R_n , включенной в цепь обмотки ротора генератора, появится напряжение $U_{вых}$, пропорциональное $U_{вх}$. Так как в обычном генераторе постоянного тока мощность возбуждения составляет 1 %–2 % от его выходной мощности, то коэффициент усиления по мощности для него равен 50–100. При повышении числа оборотов вала приводного двигателя Д коэффициент усилителя ЭМУ также растет. Для того чтобы статическая характеристика

в рабочем диапазоне была линейна, магнитопровод генератора в этом диапазоне не должен насыщаться.

Следовательно, генератор ЭМУ должен быть высокооборотным с характеристикой, не имеющей насыщения в рабочем диапазоне. В этом случае коэффициент усиления достигает величины 350–500.

Для повышения коэффициента усиления практикуется каскадное включение генераторов, когда один двигатель приводит во вращение два генератора, соединенные так, что первый генератор является возбудителем второго.

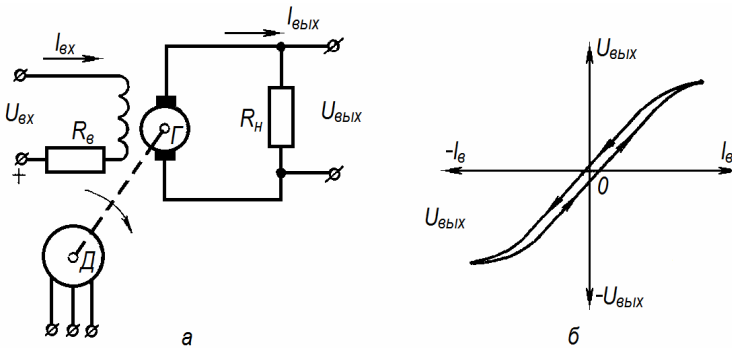


Рис. 4.28. Электромашинный усилитель

Наибольший коэффициент усиления можно получить на ЭМУ с поперечным полем (рис. 4.28, б), т. е. генератор такого ЭМУ имеет четыре щетки. Работает такой ЭМУ следующим образом. При подаче небольшого по величине входного напряжения $U_{вх}$ на обмотку возбуждения в генераторе создается небольшой продольный магнитный поток возбуждения $\Phi_{в}$, пронизывающий витки обмотки якоря, вращающегося с постоянной частотой от асинхронного двигателя. В результате этого в поперечной цепи якоря возникает ЭДС. Поперечная цепь якоря имеет малое сопротивление, поэтому по ней протекает значительный ток I_1 , который вызывает магнитный поток Φ_1 значительно больший потока $\Phi_{в}$. Под действием магнитного потока Φ_1 в продольной цепи якоря индуцируется ЭДС. Эта ЭДС вызывает появление тока I_2 , под действием которого в якоре создается продольный магнитный поток реакции якоря $\Phi_{а}$. Магнитный поток $\Phi_{г}$ во много раз больше потока возбуждения $\Phi_{в}$, и эти потоки

направлены навстречу друг другу. Магнитный поток Φ_2 размагничивает генератор, т. е. он создает как бы эффект внутренней отрицательной обратной связи. Поэтому, чтобы не произошло полного размагничивания ЭМУ и потери эффекта усиления, на статоре располагают компенсационную обмотку K , которая включается в продольную цепь якоря последовательно с якорной обмоткой и нагрузкой R_H и образующей магнитный поток Φ_k , компенсирующий поток Φ_2 . Для изменения значения потока Φ_k параллельно обмотке K включен переменный резистор $P_{ш}$. В ЭМУ с поперечным магнитным полем можно получить коэффициент усиления по мощности, равный 10^3 – 10^5 .

Полупроводниковые усилители. Соответственно трем типам ламповых схем: с общей сеткой (рис. 4.29, а), общим катодом (рис. 4.29, б) и анодом (рис. 4.29, в) полупроводниковые триоды (транзисторы) могут быть включены по схеме с общей базой (рис. 4.29, г), общим эмиттером (рис. 4.29, д) и общим коллектором (рис. 4.29, е). Принципиальное отличие усилительного каскада на транзисторе от каскада на лампе заключается в том, что транзистор (кроме полевых) всегда работает при наличии входного тока, протекающего через базу, тогда как лампа может работать и без сеточных токов.

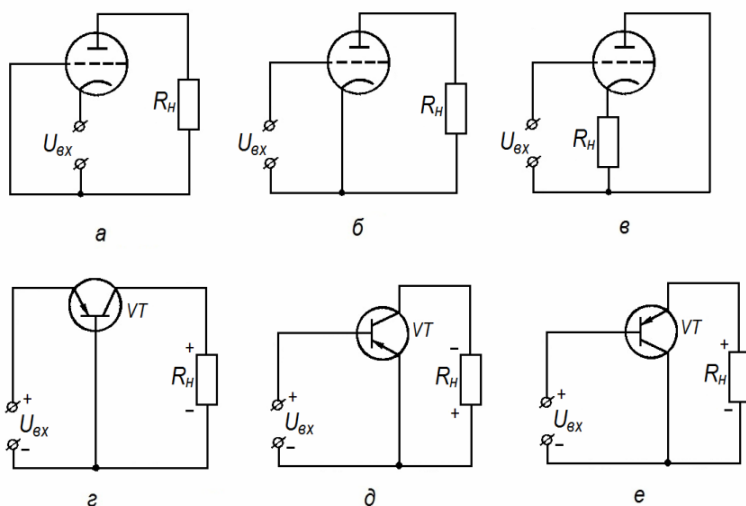


Рис. 4.29. Полупроводниковые усилители

Рассмотрим работу усилителя напряжения низкой частоты на транзисторе, включенном по схеме с общей базой (рис. 4.30, *a*). В схеме усилительного каскада без источника смещения E_c при отсутствии входного сигнала (транзистор VT будет закрыт, так как по отношению к эмиттеру база $p-n-p$ -транзистора будет иметь положительный потенциал. При подключении к входным клеммам источников синусоидального напряжения $\sim U_{вх}$ на входе каскада появится выпрямленный ток, так как в этом режиме будут усиливаться только отрицательные полуволны входного напряжения (рис. 4.30, *б*, верхний график). Выходной ток в этой схеме всегда меньше входного, так как коэффициент усиления по току:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} < 1,$$

где ΔI_k – приращение тока коллектора;
 $\Delta I_э$ – приращение тока эмиттера.

Если между базой и эмиттером включить источник напряжения смещения E_c , то по коллекторной цепи потечет постоянный ток. При подведении к входным клеммам синусоидального сигнала коллекторный ток будет соответственно этому сигналу изменять свою величину в обе стороны от среднего значения (рис. 4.30, нижний график). Этот принцип работы транзисторного каскада соответствует режиму *A*. Установка рабочей точки и изменение режима работы каскада осуществляется изменением величины смещения E_c . Емкости конденсаторов C_1 и C_2 представляют собой практически короткое замыкание для переменного тока.

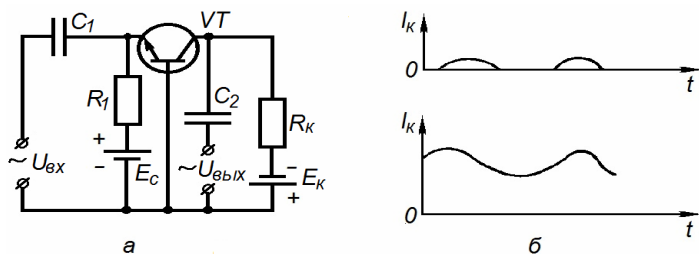


Рис. 4.30. Схема включения полупроводникового усилителя

Поэтому переменная составляющая падения напряжения на коллекторном резисторе R_k повторяет по форме входной сигнал. Мощность сигнала на нагрузке R_n (в схеме не показана) может в несколько раз превосходить мощность сигнала на входе.

Коэффициент усиления по мощности:

$$k_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \alpha^2 \frac{R_n}{R_{\text{ВХ}}}.$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$k_u = \frac{k_p}{\alpha} = \alpha \frac{R_n}{R_{\text{ВХ}}}.$$

Чтобы без искажения увеличить коэффициент усиления, последовательно включают несколько каскадов, связь между которыми выбирается трансформаторной.

Усилителем постоянного тока (УПТ) называют устройство, предназначенное для усиления медленно изменяющихся электрических колебаний, в том числе постоянных входных сигналов (нулевой частоты), с сохранением формы кривой усиливаемого сигнала.

Различают две разновидности УПТ: с непосредственным усилением сигнала постоянного тока и с предварительным преобразованием (модуляцией) сигнала постоянного тока в переменный ток, его усилением и последующей демодуляцией.

4.18. Исполнительные механизмы

Исполнительными механизмами (ИМ) САР и дистанционного управления называют устройства, осуществляющие перемещение РО в соответствии с поступающими от управляющего устройства сигналами.

Регулирующими органами могут быть различного рода дроссельные заслонки, клапаны, задвижки, шиберы, направляющие аппараты и другие органы, способные производить изменение количества энергии или рабочего вещества, поступающего в ОУ. При этом перемещение рабочих органов может быть как поступательным, так и вращательным в пределах одного или нескольких оборотов. Следовательно, ИМ с помощью рабочего органа осуществляет непосредственное воздействие на ОУ.

Для управления ИМ сигнал управляющего устройства за счет энергии внешнего источника усиливается по мощности до необходимого уровня.

В совокупности вышеперечисленные элементы составляют исполнительное устройство, структурная схема которого и обозначение на функциональных схемах автоматики приведены на рис. 4.31.

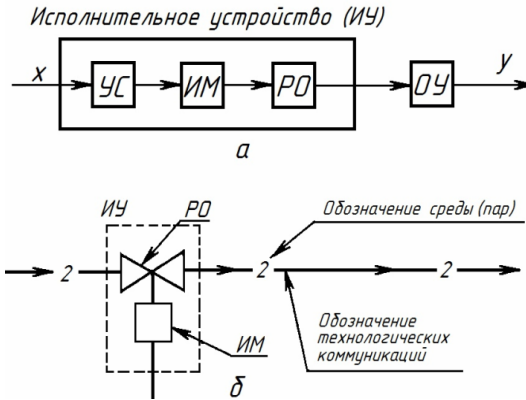


Рис. 4.31. Исполнительное устройство:

- а – структурная схема;
- б – обозначения элементов исполнительного устройства на функциональной технологической схеме

В общем случае ИМ состоят из совокупности следующих элементов: исполнительного двигателя – источника силового воздействия на РО; передаточного или преобразовательного устройства, располагающегося между исполнительным двигателем и РО и предназначенного для получения определенной скорости, направления или характера перемещения РО; конечных выключателей, служащих для ограничения перемещения РО и фиксации его положения в схемах управления и автоматического регулирования; элементов управления (пускателей, реле, золотников, клапанов и др.), защиты (предохранительных и переливных клапанов, муфт ограничения крутящего момента и др.), сигнализации и контроля (дистанционных указателей положения и др.).

Основные параметры ИМ:

- номинальное значение крутящего момента на выходном валу или усилия на выходном штоке;

- максимальное значение вращающего момента или усилия;
- зона нечувствительности (в пределах которой изменение величины управляющего сигнала не вызывает движения ИМ);
- постоянная времени, характеризующая инерционное запаздывание начала движения ИМ после подачи на его вход управляющего сигнала;
- время оборота выходного вала ИМ или хода его штока; величина инерционного выбега выходного вала ИМ.

Перемещение выходного органа ИМ после выключения механизма, работавшего в установившемся режиме, называют *выбегом*. Движущиеся массы работающего ИМ приобретают кинетическую энергию, которая гасится на пути выбега. Инерционный выбег оказывает существенное влияние на качество процесса регулирования, особенно при сокращенном ходе ИМ. Так, если выбег составляет 2 % максимального хода ИМ и ход его ограничен 0,3–0,6 м, то при линейной характеристике РО перерегулирование составит значительную величину – 6,6 %–3,3 %. Уменьшение выбега осуществляют установкой и настройкой тормозных устройств.

На работу САР оказывает влияние свободный ход выходного органа ИМ при отсутствии управляющего сигнала. Он возникает из-за зазоров в рабочих частях ИМ и износа их контактных поверхностей, влияет на границы устойчивости САР и может быть причиной возникновения в ней автоколебаний. В зависимости от типа ИМ свободный ход ограничивается следующими значениями: 0,2–0,5 мм для прямоходовых; 0,75–1,00° для однооборотных; до 3,00° для многооборотных.

Важнейшие показатели ИМ – их различные статические и динамические характеристики. По своим динамическим свойствам ИМ – интегрирующее звено с передаточной функцией вида:

$$W(p) = 1/T_{им} p,$$

где $T_{им}$ – время полного перемещения выходного органа ИМ при максимальном выходном сигнале.

Для преобразования ИМ в пропорциональное звено, в котором положение выходного органа пропорционально входному сигналу, ИМ охватывают местной жесткой обратной связью.

Классификация. Исполнительные механизмы классифицируют по следующим основным признакам: виду потребляемой энергии; характеру движения выходного органа; виду используемого двигателя и в зависимости от скорости движения выходного органа.

По виду потребляемой энергии ИМ делят на: электрические; пневматические; гидравлические (гидравлические механизмы, в которых в качестве энергоносителя используется масло, иногда называются «сервоприводами» или «сервомоторами»); прочие ИМ (использующие потенциальную энергию груза или сжатой пружины, энергию взрыва и др.).

Электрические ИМ применяют на невзрывоопасных объектах. К ним могут быть отнесены теплоэнергетические установки и котельные. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с пневматическими и гидравлическими. Подвод энергии к электрическим ИМ проще, так как монтаж кабеля осуществляется легче, чем импульсных трубопроводов. Трассы кабельных линий не требуют такого пристального повседневного внимания эксплуатационного персонала, какое требуется для пневматических и гидравлических трасс.

Однако электрические ИМ хуже, чем пневматические и гидравлические, работают в местах повышенной влажности и температуры. Одни из главных недостатков электрических ИМ – это выбег сервомотора и люфт в редукторной передаче.

Пневматические ИМ по стоимости выгодно отличаются от электрических. Однако в некоторых случаях пневматические механизмы не могут быть применены. К этим случаям относятся необходимость больших перестановочных усилий РО (более 30 000–40 000 Н) и передача команды от управляющего устройства к ИМ на большое расстояние (более 300 м). В этом случае возникают значительные запаздывания в исполнении команды.

Гидравлические ИМ имеют в основном те же достоинства и недостатки, что и пневматические ИМ, однако могут развивать значительные перестановочные усилия и применяются преимущественно на мобильных машинах. По характеру движения выходного органа ИМ делят на поворотные и прямоходные.

Поворотные ИМ бывают однооборотные и многооборотные.

По виду используемого двигателя ИМ делятся на электродвигательные, электромагнитные, поршневые и мембранные.

В зависимости от скорости движения выходного органа различают ИМ с постоянной скоростью и ИМ, у которых скорость перемещения выходного органа пропорциональна выходному сигналу.

В сельскохозяйственном производстве наибольшее распространение получили электрические ИМ, которые можно разделить на 2 основные группы: электромагнитные и электродвигательные.

К первой группе относятся прежде всего соленоидные электроприводы, предназначенные для управления различного рода регулирующими и запорными клапанами, вентилями, золотниками и т. п. Сюда же можно отнести ИМ с различными видами электромагнитных муфт. Характерная особенность ИМ этой группы состоит в том, что необходимое для перестановки рабочего органа усилие создается за счет электромагнита, являющегося неотъемлемой частью ИМ. Соленоидные механизмы обычно применяются только в системах двухпозиционного регулирования.

Ко второй группе относятся электрические ИМ с электродвигателями. Электродвигательные ИМ обычно состоят из двигателя, редуктора и тормоза (последнего может и не быть). Сигнал управления поступает одновременно к двигателю и тормозу, механизм растормаживается, и двигатель приводит в движение выходной орган. При исчезновении сигнала двигатель выключается, а тормоз останавливает механизм. Простота схемы, малое число элементов, участвующих в формировании регулирующего воздействия, и высокие эксплуатационные свойства сделали ИМ с управляемыми двигателями основой для создания исполнительных устройств современных САР.

Существуют, хотя и не получили широкого распространения, ИМ с неуправляемыми двигателями, которые содержат управляемую электрическим сигналом механическую, электрическую или гидравлическую муфту. Характерная их особенность заключается в том, что двигатель работает непрерывно в течение всего времени работы системы регулирования, а сигнал управления передается рабочему органу через управляемую муфту.

4.19. Контроллеры

Контроллер — это устройство локального управления, работающее в реальном масштабе времени по определенному алгоритму, который может быть задан аппаратно либо программно.

Первые контроллеры выполняли в виде электромеханических командоаппаратов. Это были преимущественно барабанные коммутаторы электрических или пневматических цепей. Реализуемый ими алгоритм управления определялся положением кулачков (штифтов) на вращающемся барабане, которые в заданной последовательности замыкали или размыкали цепи питания ИМ.

Затем стали создавать контроллеры в виде автоматов, алгоритм действия которых определялся схемой соединения логических элементов. Эти контроллеры называли контроллерами с «жесткой логикой».

В современных САУ широко применяют контроллеры на базе микропроцессоров. Их алгоритм действия определяется не способом соединения отдельных элементов, а программой, вводимой в виде машиночитаемых кодов в блок памяти. Такие контроллеры называют программируемыми, основные их преимущества: высокая надежность, универсальность и гибкость. Один и тот же программируемый контроллер в зависимости от записанной в его памяти программы можно использовать для решения различных задач управления. Для обновления программы либо заменяют БИС памяти на другую, в которую «защита» новая рабочая программа, либо перепрограммируют имеющуюся в контроллере соответствующую БИС памяти.

Возможность быстрого внесения различных изменений в алгоритм управления программным путем без изменения аппаратной части управляющей системы обеспечивает большую гибкость программируемых контроллеров и значительно сокращает время проектирования систем управления.

В то же время в состав таких контроллеров пришлось вводить специальные устройства, которые обеспечивали бы их взаимодействие с периферийными устройствами, в том числе оперирующими нецифровыми сигналами. Комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих взаимодействие контроллера с периферийными устройствами, называют интерфейсом контроллера.

В общем случае контроллер имеет центральный процессор с перепрограммируемым блоком памяти, клавиатуру ввода команд и данных, а также интерфейс связи с внешними устройствами, к которым относятся датчики технологических параметров и исполнительные механизмы. Алгоритм функционирования обеспечивается программой, которая хранится в перепрограммируемой памяти и может быть изменена оператором с помощью клавиатуры.

Современные программируемые контроллеры PC-совместимые. Их программируют с помощью персональных компьютеров, использующих специальные инструментальные программы, написанные на языках высокого уровня. Наибольшее распространение за последнее время получило объектноориентированное программирование с помощью работающих в сред Windows программных продуктов, имеющих общее название SCADA-систем.

Типовая функциональная схема контроллера системы регулирования расхода приведена на рис. 4.32.

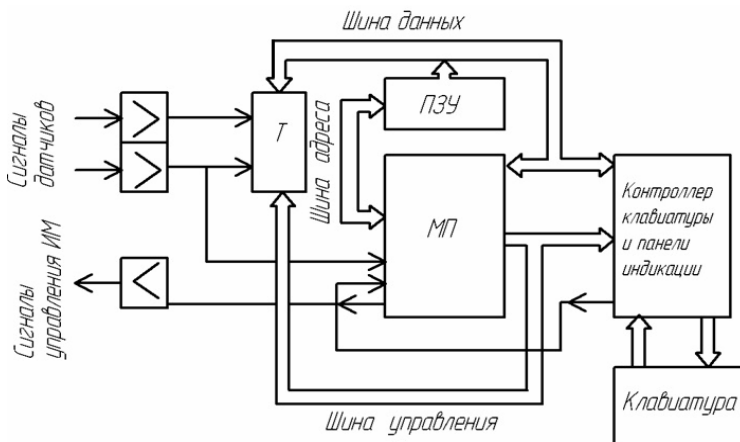


Рис. 4.32. Функциональная схема контроллера

В состав контроллера входят: микропроцессор (МП), программируемое запоминающее устройств (ПЗУ), программируемый таймер (Т), клавиатура и панель цифровой индикации. Клавиатура имеет цифровое наборное поле, функциональные клавиши для перевода контроллера в различные режимы работы; программирование; управление технологическим процессом; тестирование и индикация сигналов датчиков и сигналов управления от ИМ. Для индикации параметров предусмотрена панель индикации на жидких кристаллах.

Датчики непрерывных сигналов подключаются к микропроцессору через аналого-цифровой преобразователь. Программа управления параметрами ТП хранится в программируемом запоминающем

устройстве (ПЗУ). Информация поступает в микропроцессор по специальным шинам: управления, данных и адресов.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое ТС автоматики?
2. Приведите классификацию ТС автоматики.
3. Назовите основные характеристики средств автоматики.
4. Назовите характеристики датчиков и приведите классификацию.
5. Приведите пример механических датчиков.
6. Приведите пример применения датчиков: потенциометрических; тензометрических; электромагнитных; электронных; емкостных; пьезоэлектрических; фотоэлектрических; радиотехнических и ультразвуковых; температуры; гидравлических и пневматических; Холла.
7. Приведите пример использования сравнивающего устройства на сельскохозяйственной машине.
8. Назовите основные характеристики задающих устройств.
9. Приведите классификацию усилительных устройств.
10. Назовите характеристики усилительных устройств.
11. Приведите пример использования исполнительных механизмов на сельскохозяйственных машинах.
12. Назовите составные части контроллера.

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПОДГОТОВКИ ПОЧВЫ, ПОСЕВА, УБОРКИ И ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

5.1. Системы автоматического регулирования глубины пахоты и культивации

Основная задача систем регулирования глубины пахоты и культивации заключается в стабилизации глубины вспашки и рыхления, установленной агротехническими требованиями. В соответствии с агротехническими требованиями отклонения глубины пахоты на ровных участках не должны превышать $\pm 1-1,5$ см, а на неровных участках 2–3 см. Неравномерность глубины обработки при культивации не должна превышать ± 1 см.

Существует два основных принципа построения САР глубины пахоты – силовой и по отклонению. При использовании силового принципа система регулирования строится на основе измерения тягового усилия. Способ по отклонению использует сигнал, измеряющий расстояние от поверхности почвы до режущей кромки плуга. Естественно, что силовой принцип построения системы регулирования является косвенным и поэтому при изменении физико-механических свойств почвы в системе, построенной по такому принципу, будут наблюдаться изменения глубины пахоты. Наиболее распространён именно этот не вполне совершенный принцип. Объясняется это простой конструкцией системы. Принципиальная схема такой системы изображена на рис. 5.1.

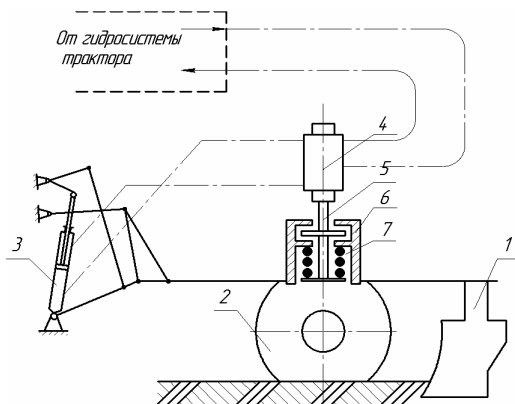


Рис. 5.1. Силовое регулирование глубины хода плуга

Среди разнообразных систем, предложенных для этой цели, наибольший интерес представляет САУ, в которой управление глубиной пахоты ведется по величине реакции опорного колеса плуга. Объектом управления *1* в данной схеме является плуг. Воспринимающим органом служит опорное колесо *2*. Кронштейны *б* в сочетании с пружиной *7* представляют собой сравнивающий орган системы. Исполнительным органом *4* является гидроусилитель. В процессе работы вертикальная составляющая реакции почвы от веса плуга передается через опорное колесо *2*, пружину *7*, размещенную в кронштейне *б*, и колесную стойку *5* на золотник *4* силового гидроцилиндра *3*. При нормальной глубине пахоты, задаваемой пружиной *7*, рабочая жидкость гидросистемы идет на слив через гидрораспределитель *4* и в гидроцилиндр *3* не подается. С увеличением глубины пахоты реакция на опорное колесо возрастает, золотниковое устройство открывается, вызывая срабатывание силового гидроцилиндра *3*, который несколько приподнимает корпус плуга, восстанавливая глубину пахоты. Если глубина пахоты уменьшается, то вся система действует в обратном направлении.

Рассмотрим работу системы, построенной на принципе управления по отклонению. Принципиальная схема такой системы изображена на рис. 5.2.

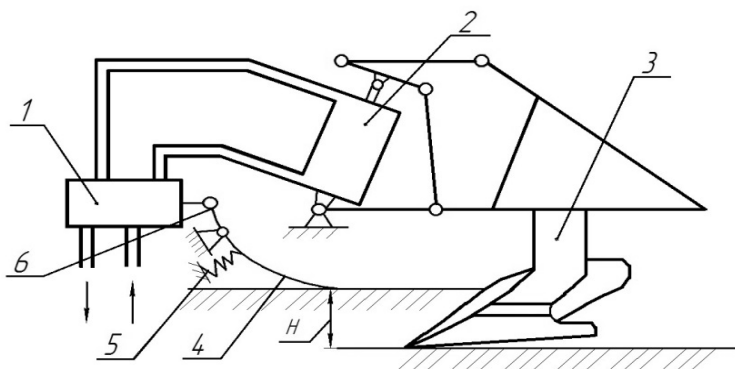


Рис. 5.2. Система регулирования глубины пахоты по отклонению:
1 – золотниковый гидрораспределитель; *2* – гидроцилиндр; *3* – плуг;
4 – качающаяся планка с ползунком; *5* – пружина; *б* – винт

Измерительным устройством регулятора по отклонению является качающаяся планка с ползунком 4. Отклонение планки с ползунком передается на золотниковый гидрораспределитель 1, который управляет работой гидроцилиндра 2.

Действие системы происходит следующим образом. При отклонении глубины вспашки H в сторону увеличения планка с ползунком под действием пружины 5 отклонится и переместит плунжер золотникового гидрораспределителя. Масло от гидрораспределителя под давлением начнет поступать в нижнюю часть гидроцилиндра. Поршень гидроцилиндра поднимется вверх и тем самым уменьшит заглубление плуга. При уменьшении глубины пахоты система будет действовать в обратном направлении.

При резко изменяющихся физико-механических свойствах почвы применяется комбинированный способ регулирования глубины вспашки по отклонению и силовой. Резко возрастающие тяговые сопротивления приводят к временной пробуксовке движения трактора, требуют перехода на пониженную передачу или принудительное ручное выглубление орудия. Силовой преобразователь позволяет в значительной степени сгладить эти возмущения и увеличить производительность пахотного агрегата. Конструкция комбинированной системы регулирования описана в литературе.

САР глубины культивации и хода подкапывающих рабочих органов картофелеуборочного комбайна строится на основе принципа управления по отклонению. Чувствительным элементом системы является каток, который посредством рычажного механизма прикреплен к раме агрегата и прижимается к поверхности земли пружиной. Остальные элементы автоматической системы такие же, как у рассмотренных систем.

Функциональная схема показана на рис. 5.3, а. На схеме изображены все функциональные элементы и связи между ними.

Объект управления – плуг 3, выходная величина объекта – глубина вспашки H , а входная – перемещение штока поршня 1. Воспринимающим элементом служит ползунковый копир 4, на вход которого поступает сигнал об отклонениях величины H , а выходом является пропорциональное отклонению перемещение плунжера золотникового гидрораспределителя y . Управляющий элемент – золотниковый гидрораспределитель, на выходе которого при изменении появляется поток масла q , пропорциональный y . Поток масла

q , направленный в ту или иную полость гидроцилиндра, является его входным воздействием. Выходом гидроцилиндра, который служит исполнительным механизмом системы, будет перемещение штока поршня l , изменяющее положение объекта управления и его выходную величину H . Задающий элемент системы – винт b , способный изменять положение воспринимающего элемента и задавать различную величину H . Таким образом, элементом сравнения является сам воспринимающий элемент (положение основания копира относительно режущей кромки плуга). Только в случае соответствия действительной и заданной H величин золотник гидрораспределителя будет устанавливаться в такое положение, при котором масло от гидросистемы не будет попадать в исполнительный механизм.

Возмущающими воздействиями F объекта управления являются неровности поверхности поля, по которым движется ползковый копир, а также вертикальные колебания плуга, возникающие при движении пахотного агрегата.

Структурная схема показана на рис. 5.3, б.

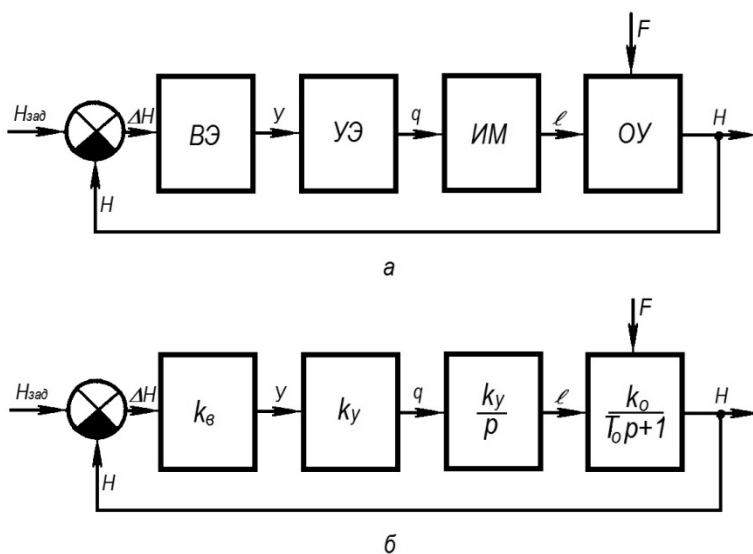


Рис. 5.3. Схемы САР глубины пахоты:
а – функциональная; б – структурная

5.2. Автоматическое регулирование глубины заделки семян

Урожай в значительной степени зависит от глубины заделки семян. При отклонении глубины заделки семян от заданной на ± 2 см урожайность зерновых снижается на 10 %–12 %. Для всхожести семян льна глубина заделки имеет весьма существенное значение. Так, при заделке семян на оптимальную глубину 1,5–2,0 см всхожесть составляет 90 %, при глубине 5...6 см – 20 %...30 %.

Определить глубину заделки семян непосредственно при выполнении посевных операций весьма сложно. Однако о глубине заделки семян можно судить по косвенному показателю – глубине хода сошников. Экспериментальными исследованиями установлено, что между глубиной хода сошников и глубиной заделки семян существует тесная корреляционная связь. Коэффициент корреляции этих величин равен 0,8. Причем установлено, что глубина хода сошников на 1,5 см больше, чем глубина заделки семян.

Глубина хода сошников зависит от скорости движения посевного агрегата, физико-механических свойств почвы, в первую очередь от плотности почвы, а также от конструктивных и эксплуатационных особенностей сеялок, определяющих их динамические характеристики. По данным ряда исследований, в среднем с увеличением скорости движения посевного агрегата на 1 км/ч выглубление сошников составляет 3 %–4 % заданной глубины хода сошников.

Указанные особенности работы посевных агрегатов положены в основу при создании САР глубины заделки семян.

Автоматический регулятор глубины хода сошников реагирует на изменения скорости движения посевного агрегата. Входным управляющим воздействием системы является скорость движения агрегата.

На рис. 5.4 показан автоматический корректор глубины хода сошников зерновой сеялки по скорости движения агрегата. Регулирование глубины хода сошников 1 осуществляется силовым гидроцилиндром 2, который питается от гидрораспределителя 3 трактора.

Величина давления подпора, а, следовательно, и глубина хода сошников устанавливаются вручную путем изменения количества масла, перепускаемого на слив через регулятор давления 4.

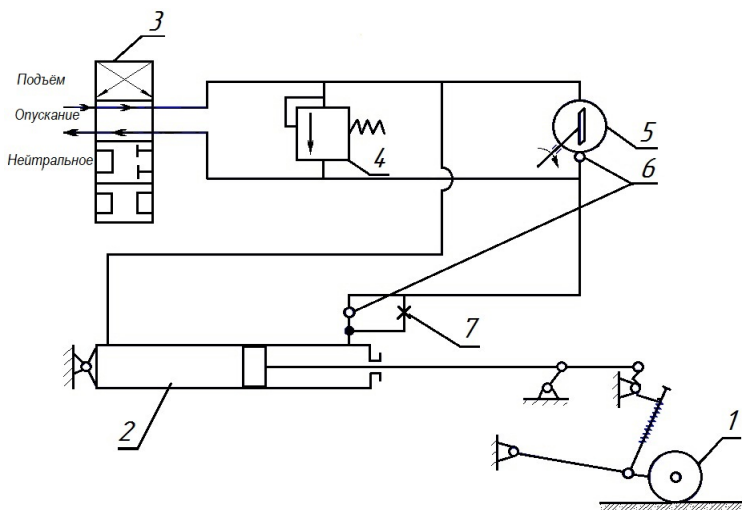


Рис. 5.4. Схема автоматического корректора глубины хода сошников

При движении посевного агрегата начинает вращаться ротор вихревого дросселя 5. При этом при увеличении скорости движения давление подпора увеличивается, шток гидроцилиндра 2, выдвигаясь, сжимает пружину сошника 1, препятствуя выглублению его от увеличения скорости. При уменьшении скорости движение давления подпора уменьшается, пружины сошников, выпрямляясь, сдвигают поршень гидроцилиндра 2 несколько влево, вертикальное усилие на сошники уменьшается, и глубина их хода остается прежней. Таким образом обеспечивается постоянная средняя глубина хода сошников при переменной скорости движения посевного агрегата. Давление подпора действует только на заглубление сошников, вследствие чего выбираются зазоры в соединениях гидроцилиндр-сошник и обеспечивается хорошее быстродействие устройства.

Параллельное соединение регулятора давления 4 и вихревого дросселя 5 с гидроцилиндром обеспечивает «плавающее» положение последнего, что обеспечивает лучшее копирование сошниками микронеровностей поверхности поля.

Для подъема сошников 1 в транспортное положение рычаг гидро-распределителя 3 трактора переводится в положение подъема, масло

под давлением закрывает обратный клапан 6 и поступает на надпоршневую полость гидроцилиндра 2, поршень которого, перемещаясь влево, поднимает сошники. По окончании подъема сошников рычаг гидрораспределителя 3 переводится в нейтральное положение.

5.3. Автоматическое регулирование положения режущих аппаратов уборочных машин

Неравномерность среза убираемых культур влияет на потери урожая за жаткой, а также на выполнение последующих технологических операций уборки. Применение автоматической системы копирования рельефа на силосоуборочных комбайнах позволило собрать с каждого гектара на 1,91 т силоса больше, то есть повысить урожайность на 4,5 %. Применяемые в настоящее время пассивные механические системы опорного копирования рельефа не могут эффективно работать как на твердых почвах в связи с частой потерей контакта с почвой, так и на слабонесущих почвах в связи с частым зарыванием опорных башмаков в почву. Не являются эффективными и гидравлические компенсационные устройства, обеспечивающие постоянное давление опорных башмаков на поверхность почвы, которые на слабонесущих грунтах вообще неприменимы.

Для наиболее эффективного использования режущих уборочных агрегатов применяется замкнутая система автоматического регулирования. В качестве чувствительного элемента используется шарнирно закрепленный на жатке контактный рычаг с башмаком, копирующим рельеф поля. Остальные элементы автоматической системы конструктивно не отличаются от подобных элементов систем регулирования глубины хода рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов.

Разрабатываются системы бесконтактного регулирования величины среза зерновой массы на заданном расстоянии от колосьев. Система содержит фотоэлементы, измеряющие длину срезаемых стеблей.

Рассмотрим работу системы на примере управления высотой среза кукурузоуборочного комбайна (рис. 5.5), которая позволяет автоматически копировать рельеф поля, благодаря чему высота среза рабочих органов может быть установлена минимальной, а это приводит к существенному сокращению потерь зеленой массы в процессе уборки.

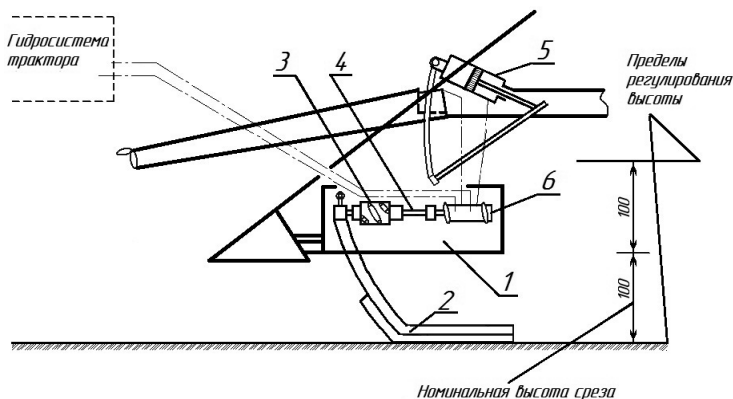


Рис. 5.5. Система автоматического поддержания высоты среза

Объектом управления *1* данной системы являются рабочие органы комбайна, установленные на определенную высоту среза, а воспринимающим органом, контролирующим высоту среза при изменении рельефа почвы, служит ползковый копир *2*. От воспринимающего органа сигнал через предохранительную муфту *3* и тягу *4* передается на золотниковое устройство *6* гидроцилиндра *5*, играющего роль исполнительного органа системы. Если поверхность поля ровная и высота среза соответствует заданной, то золотник *6*, устанавливается в такое положение, при котором масло из трубопроводов высокого давления сливается в бак, минуя гидроцилиндр *5*. Если же высота среза окажется отличной от заданной, то воспринимающий орган *2* отклонится в ту или иную сторону и вызовет тем самым перемещение золотника. Теперь масло под высоким давлением поступит в одну из полостей силового гидроцилиндра *5* и таким образом переместит рабочие органы комбайна, что высота среза станет нормальной. Предохранительная муфта *3* предотвращает поломки золотника при наезде копира на препятствия.

Как было показано выше, применение систем регулирования положения машин и отдельных рабочих органов относительно поверхности поля может дать значительный экономический эффект за счет улучшения качества технологических процессов, снижения потерь сельскохозяйственной продукции, а также за счет увеличения производительности труда. Однако пока не все рассмотренные нами системы находят широкое применение в производстве.

5.4. Автоматическое вождение мобильных агрегатов

САР направления движения машин и отдельных рабочих органов служат для поддержания движения агрегатов или их рабочих органов по заданным траекториям и ориентирам. Эти системы могут быть разделены на следующие основные группы: системы автоматического вождения (САВ) мобильных сельскохозяйственных агрегатов; САВ самоходных сельскохозяйственных машин; системы автоматического направления движения рабочих органов сельскохозяйственных орудий при междурядной обработке.

При работе на машинно-тракторном агрегате водитель выполняет одновременно несколько операций: управляет направлением движения агрегата, контролирует качество выполнения технологических операций орудиями агрегата и управляет режимом работы двигателя. Все эти операции определяют физическую и психологическую нагрузку на механизатора. Эта нагрузка характеризуется однообразием действий при управлении движением агрегата. Поэтому работа по созданию САВ тракторов началась с момента их создания. Уже в 1911 г. в России было зарегистрировано изобретение «Автоматически действующий руль для пахотных тракторов». В 1930 г. делались попытки осуществить вождение колесных тракторов с помощью механических направителей. С 1957 г. тракторы оснащали первыми опытными устройствами для автоматического вождения.

Работы над созданием совершенных САВ сельскохозяйственных агрегатов ведутся и в настоящее время. Особенно это важно для увеличения скорости движения машинно-тракторных агрегатов. Известно, что от момента регистрации механизатором какого-либо отклонения в ведении технологического процесса до начала реакции системы на это отклонение проходит не менее 1 с. За это время агрегат, двигаясь со скоростью 10 км/ч, пройдет 2,8 м. Поэтому при увеличении скорости и ширины захвата мобильных агрегатов механизатору без автоматических средств вождения невозможно обеспечить необходимое качество выполнения технологических операций.

Автоматическое вождение пахотных агрегатов

Значительное облегчение условий труда тракториста и уменьшение его психофизической нагрузки при пахоте достигается использованием систем автоматического вождения.

Базовой линией, по которой осуществляется автовождение, является граница вспаханного и не вспаханного поля или борозда предыдущего прохода, которая копируется различного рода устройствами. Среди этих устройств наиболее широко применяются механические копиры различной конструкции. Ведутся работы по созданию индукционных систем вождения, воспринимающих магнитное поле постоянно проложенных токоведущих проводов (шпалерная проволока на виноградниках, подземные кабели).

На рис. 5.6 показана САВ агрегата с колесным трактором вдоль борозды. При движении трактора 1 (рис. 5.6, а) вдоль направляющей борозды боковое давление почвы, воспринимаемое рабочими органами плуга 3, передается на копир 2 и полевую доску 4, вследствие чего они постоянно прижаты к стенкам борозд. Так как плуг соединен с трактором подвижно, он независимо от трактора копирует направляющую борозду.

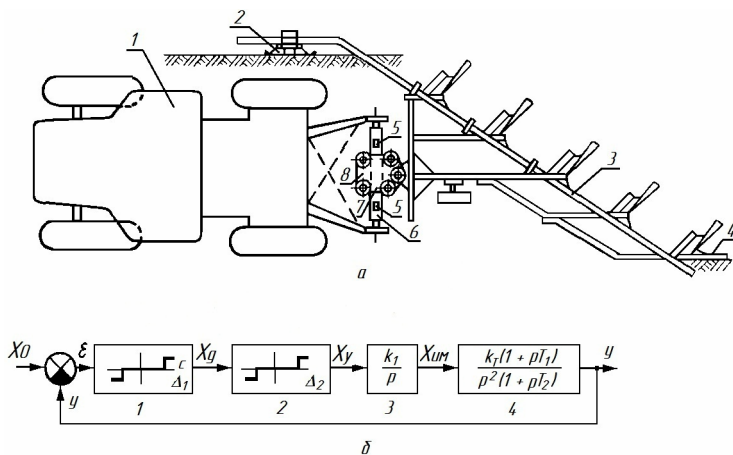


Рис. 5.6. САВ агрегата с колесным трактором вдоль борозды:
а – общий вид; б – структурная схема

Автоматическое управление трактором включается выключателями 5. Если трактор отклоняется в сторону от орудия, то вместе с ним смещается поперечная балка 6, и каретка 8, двигаясь по балке на роликах 7, упирается в один из выключателей 5, который замыкает цепь питания электрогидравлического усилителя механизма поворота, вызывая поворот трактора в нужную сторону.

При малом числе рабочих органов применяется простейшая конструкция копира в виде полозка 2, а при большом числе рабочих органов и на рыхлых почвах – в виде наклонного катка.

Структурная схема системы показана на рис. 5.6, б, где приняты следующие обозначения: 1 – чувствительный элемент, 2 – гидрораспределитель, 3 – гидроцилиндр, 4 – трактор.

Разработаны САВ, которые имеют два контура управления. Один контур вырабатывает управляющее воздействие на основе линейного отклонения агрегата. Второй контур управляет агрегатом по отклонению от заданного курса. Контур управления по отклонению ничем не отличается от рассмотренных нами систем вождения. Регулятор управления по курсу прямого действия. Его действие начинается после действия контура системы управления по линейному отклонению. При ликвидации ошибки по линейному отклонению в действие вступает силовая трапеция, состоящая из Т-образной рамы и двух пружин и являющаяся преобразователем и исполнительным механизмом. Т-образная рама системой рычагов связана с рулевой трапецией. При наличии угла между заданным курсом и положением колес трактора после ликвидации линейного отклонения действием пружин этот угол исчезает.

Автоматизация вождения самоходных зерноуборочных комбайнов

Автоматизация вождения комбайна на рабочем гоне обеспечивает повышение производительности комбайна при прямом комбайнировании не менее чем на 6 % при одновременном значительном снижении утомляемости комбайнера, у которого до 80 % рабочего времени затрачивается на процесс управления (вождения).

На рис. 5.7 показана схема электронно-гидравлической САВ самоходного зерноуборочного комбайна при прямом комбайнировании и скашивании хлебов в валки. Электрический сигнал от чувствительного элемента 2 (рис. 5.7, а) положения бровки скошенного хлеба поступает в электронный управляющий блок 4, где суммируется с электрическим сигналом от устройства 5 обратной связи по положению направляющих колес комбайна. По сигналам от устройств 5 и 2 формируется сигнал управления на электрогидравлический распределитель 1, управляющий силовым гидроцилиндром 6 поворота направляющих колес. Выход распределителя 1 включен параллельно выходу распределителя 8 ручного управления

комбайном. Распределитель 8 включен через электрогидравлический кран 7 переключения режимов вождения, управляемый от общей цепи питания системы, которая включается тумблером 3.

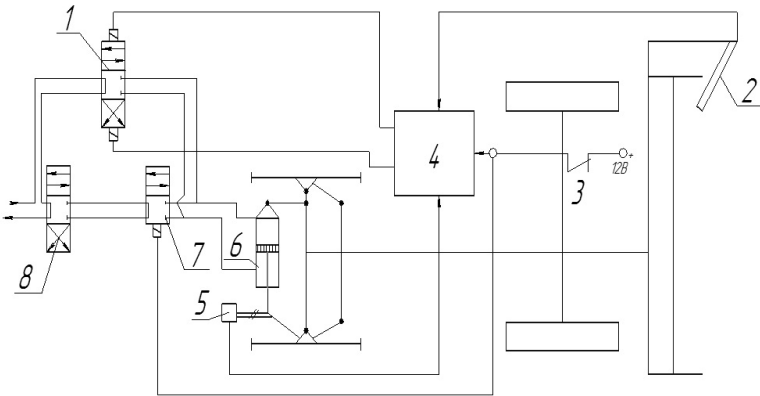


Рис. 5.7. Функциональная схема САВ зерноуборочного комбайна:

- 1 – электрогидравлический распределитель; 2 – датчик бровки нескошенного хлеба;
 3 – тумблер; 4 – электронный управляющий блок; 5 – датчик положения колес;
 6 – гидроцилиндр поворота управляемых колес; 7 – электрогидравлический кран;
 8 – гидравлический распределитель

САВ работает по принципу сведения к нулю ошибки вождения, которая измеряется чувствительным элементом 5 бровки нескошенного хлеба. При отклонении комбайна от бровки управляющий блок 4 по сигналу от устройства 2 обеспечивает поворот направляющих колес комбайна в соответствующую сторону для возвращения комбайна к бровке.

САВ самоходных сельскохозяйственных машин

При уборке урожая на самоходных уборочных машинах примерно 80 % времени механизатор затрачивает на операции, связанные с вождением. Специфика условий проведения сельскохозяйственных работ такова, что при ручном управлении современные энергонасыщенные машины могут быть использованы только на 60 %–70 %. При этом после первых 3–4 ч работы неизбежно снижается качество выполняемых операций.

САВ самоходных сельскохозяйственных машин позволяют повысить производительность труда на гоне, улучшить качество проведения технологических операций и облегчить труд механизатора.

Созданные в настоящее время САВ построены в основном на методе ориентации с использованием естественных ориентиров поля. Встречаются системы с использованием метода копирования.

На рис. 5.8 приведена принципиальная схема САВ самоходных свеклоуборочных комбайнов. Система осуществляет управление передними колесами машины с требуемой точностью вдоль убираемых рядков. Работа системы построена на гидромеханическом принципе.

Копирующее устройство состоит из трех преобразователей 1 ползкового типа, установленных на параллелограммных подвесках и подвешенных к брусу рамы на поворотных кронштейнах. Для заглубления перьев в почву преобразователь имеет культиваторную лапу, что повышает надежность нащупывания корней. Применение трех преобразователей повышает надежность отслеживания рядков при наличии пропусков корней в рядках. Для усреднения показателей преобразователи соединены поперечной тягой.

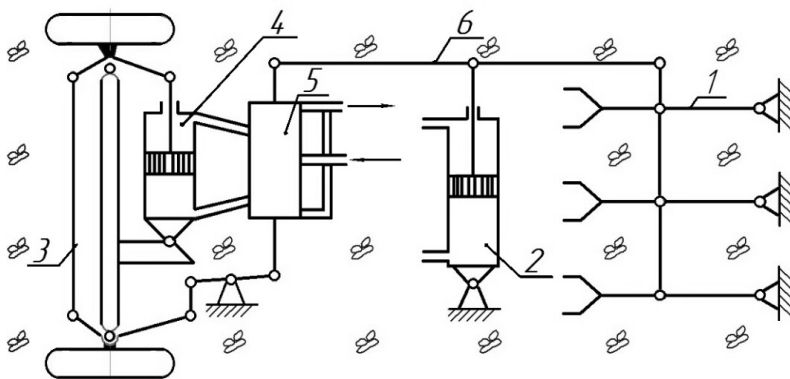


Рис. 5.8. Упрощенная принципиальная схема системы автоматического вождения свеклоуборочных комбайнов:

- 1 – копир; 2 – гидроцилиндр ручной коррекции; 3 – рулевая трапеция;
4 – гидроцилиндр; 5 – гидрораспределитель; 6 – рычаг

При отклонении преобразователей рычаг 6 передает отклонение на золотниковый гидрораспределитель 5, который подает масло от гидросистемы в одну из полостей гидроцилиндра 4, и шток гидроцилиндра, воздействуя на рулевую трапецию 3, поворачивает колеса

в нужном направлении. Положение копиров относительно рамы корректируется при помощи гидроцилиндра ручной коррекции 2.

Структурная схема гидромеханической САВ машин показана на рис. 5.9.

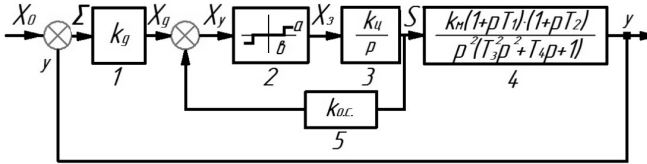


Рис. 5.9. Структурная схема гидромеханической САВ комбайна: 1 – копир, 2 – гидрораспределитель, 3 – гидроцилиндр, 4 – корнеуборочная машина, 5 – обратная связь

На рис. 5.10 показана принципиальная схема электрогидравлического автомата вождения самоходного свеклоуборочного комбайна. Принцип его работы аналогичен рассмотренной ранее гидромеханической системе автовождения.

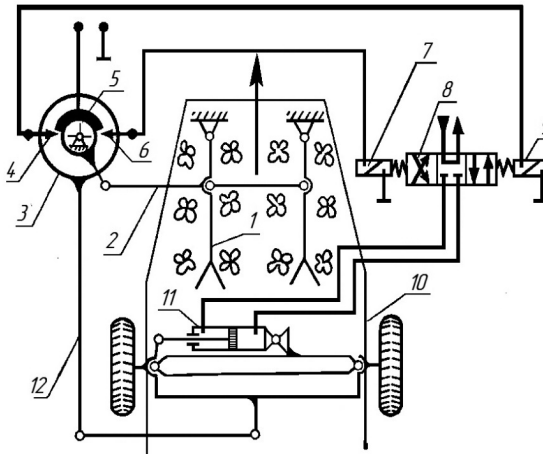


Рис. 5.10. Схема электрогидравлического автомата вождения самоходного свеклоуборочного комбайна:

- 1 – копирующий шуп; 2 – рычажная связь; 3 – контактная головка;
- 4, 6 – контакты, закрепленные на контактной головке; 5 – контактный сектор;
- 7, 9 – электромагниты; 8 – гидрозолотник; 10 – рама машины;
- 11 – гидроцилиндр; 12 – механизм обратной связи

Отличительной особенностью автомата является конструкция контактной головки, которая обеспечивает опережение отключения электромагнитного золотника по углу поворота колес. Введение опережающего отключения значительно увеличивает запас устойчивости системы автовождения.

Дальнейшим этапом совершенствования САВ самоходных свеклоуборочных машин явилось создание автомата вождения с использованием электронной техники. Здесь полностью отсутствуют электроконтактные устройства и элементы; осуществлен релейно-импульсный принцип управления, который в сочетании со схемой форсированного включения и отключения электромагнитов гидрораспределителя позволяет получить высокую и достаточно стабильную во времени точность управления положением управляемых колес ($0,15^\circ-0,30^\circ$). В системе используются индуктивно-трансформаторные датчики угла поворота копира и управляемых колес.

5.5. Автоматическое управление скоростными и нагрузочными режимами

САР нагрузочных режимов предназначены для поддержания требуемого уровня загрузки машин и отдельных рабочих органов технологическим материалом в соответствии с их пропускной способностью. Существующие системы управления нагрузочными режимами можно разделить на две основные группы:

- системы управления нагрузочными режимами двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин;
- системы управления нагрузочными режимами уборочных сельскохозяйственных машин.

Автоматическое регулирование загрузки молотилки самоходных зерноуборочных комбайнов

Основное условие эффективного использования уборочных машин – правильная загрузка рабочих органов и двигателя. Загрузка рабочих органов уборочных машин определяется главным образом количеством перерабатываемой массы, поступающей в машину, и ее физико-механическими свойствами. Допустимое количество поступающей в машину массы при определенных

физико-механических свойствах задается качеством выполняемого процесса уборки. Качество процесса характеризуется качеством и потерями выпускаемой продукции.

Принципы построения САР загрузочных режимов уборочных машин рассмотрим на примере зерноуборочного комбайна.

Агротехнические требования к процессу уборки зерновых культур определяют следующие условия:

- потери зерна за жаткой допускаются не более 0,5 % для прямостоячих хлебов 1,5 % – для полеглых;
- потери зерна при подборе валков не должны превышать 1 %;
- общие потери зерна при прямом комбайнировании не должны превышать 1,5 %–2 %;
- чистота зерна в бункере должна быть не ниже 95 %–96 %;
- дробление зерна не должно превышать 2 %.

Процесс уборки осуществляется современными зерноуборочными комбайнами типа «Гомсельмаш», «Ростсельмаш» и т. д. Процесс уборки и переработки урожая в этих комбайнах примерно одинаков.

Качество уборки зависит от количества хлебной массы, подаваемой в молотилку комбайна в единицу времени, и физико-механических свойств этой массы. Количество подаваемой массы определяется урожайностью, скоростью передвижения агрегата и высотой среза. Физико-механические свойства хлебной массы определяются в первую очередь влажностью и затем соломистостью, засоренностью, степенью зрелости и т. д. Причем потери зерна возрастают с увеличением количества подаваемой массы, ее влажности, соломистости и засоренности.

На рис. 5.11 показан автоматический регулятор загрузки зерноуборочного комбайна по толщине слоя хлебной массы под транспортером наклонной камеры.

Регулятор состоит из преобразователя толщины слоя хлебной массы *б*, установленного на нижней ведущей ветви транспортера *1* наклонной камеры, который через направляющий ролик *5* при помощи тросика *2* соединен с золотниковым гидрораспределителем *4*, пружинного компенсатора *3* и механизма настройки регулятора на требуемую толщину хлебной массы.

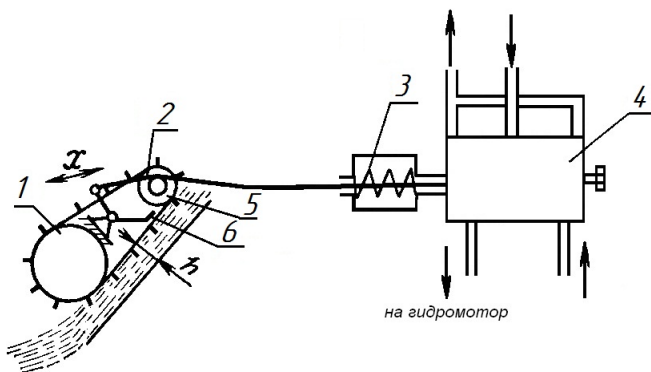


Рис. 5.11. Упрощённая принципиальная схема гидромеханического регулятора загрузки зерноуборочного комбайна:
 1 – транспортёр; 2 – трос; 3 – демпфирующее устройство; 4 – гидрораспределитель;
 5 – направляющий ролик; 6 – преобразователь

Работа автоматического регулятора загрузки молотилки комбайна происходит следующим образом. При изменении подачи хлебной массы рычаг преобразователя поворачивается и посредством троса смещает плунжер золотникового гидрораспределителя. Масло из гидрораспределителя поступает в гидроцилиндр, и он своим штоком перемещает блок шкивов вариатора. При этом изменяется поступательная скорость перемещения зерноуборочного комбайна и соответственно изменяется подача хлебной массы в молотильный барабан. Для того чтобы автоматическая система не реагировала на кратковременные резкие колебания, вызванные вибрацией цепей транспортера и самоходного комбайна, случайными одноразовыми увеличениями подачи массы, преобразователь соединен с плунжером гидрораспределителя через компенсатор, который поглощает высокочастотные возмущения системы. При изменении физико-механических свойств хлебной массы, поступающей в молотилку, ее толщину регулируют вручную при помощи механизма настройки.

В зонах повышенного увлажнения изменение физико-механических свойств хлебной массы – определяющий фактор при загрузке молотильного барабана. В этих условиях применять рассмотренную выше систему неэффективно. Для учета изменения физико-механических свойств хлебной массы устанавливают

преобразователь частоты вращения вала молотильного барабана или его крутящего момента. Однако работа системы только с преобразователями частоты вращения или крутящего момента также неэффективна из-за значительного транспортного запаздывания входного сигнала. Поэтому современные системы являются двухмерными, они вырабатывают управляющее воздействие в зависимости от двух сигналов: преобразователя толщины хлебной массы под транспортером наклонной камеры или под шнеком жатки и преобразователя крутящего момента на валу молотильного барабана. Причем управляющий сигнал на гидрораспределитель поступает от логического устройства, анализирующего сигналы от преобразователей.

Для сложных уборочных машин разрабатываются САР по нескольким параметрам (многомерные системы). Логическое устройство, которое вырабатывает управляющее воздействие на основе данных отдельных преобразователей, работает по принципу адаптивных (самонастраивающихся) систем. Подобного рода автоматические системы загрузочных режимов создаются и для других видов уборочных машин, таких как кукурузоуборочный, картофельуборочный, свеклоуборочный комбайны и др.

При построении автоматических систем используют те же принципы, что и при построении системы загрузки зерноуборочного комбайна. Кроме гидромеханической системы (рис. 5.11), применяются электрогидравлические, принцип работы которых был рассмотрен нами при изучении систем вождения машинно-тракторных агрегатов.

Эти системы отличаются между собой только воспринимающим элементом. Например, преобразователем системы загрузки картофелеуборочного комбайна грохотной модификации служат баллоны комкодавителя, измеряющие толщину слоя массы, поступающей на транспортер комкодавителя. Преобразователь картофелеуборочного комбайна элеваторного типа – приводной валик, который может перемещаться в вертикальной плоскости. Он измеряет толщину клубненоносной массы на выходе сепаратора. Преобразователем силосоуборочного комбайна служит битерный барабан, положение которого по высоте изменяется пропорционально массе растений, подаваемой в комбайн.

В последнее время развиваются методы проектирования адаптивных автоматических систем с алгоритмом оптимального функционирования уборочных машин. В этом случае управляющее воздействие выбирают на основе анализа загрузки всех узлов уборочной машины и оптимизации функции выхода. Функция выхода определяется усредненными показателями производительности комбайна и потерь. С увеличением производительности потери увеличиваются. Управление вырабатывается таким образом, чтобы функция выхода была наибольшей.

Применение на самоходных комбайнах адаптивных многомерных автоматических систем поддержания оптимальной загрузки позволяет повысить пропускную способность до 90 %–95 % её максимального значения при сохранении качества технологического процесса в пределах, допустимых агротребованиями. Достижимое при этом повышение производительности зависит от условий работы, изменчивости урожайности и физико-механических свойств убираемой культуры. При коэффициенте вариации параметров физико-механических свойств фракций убираемого урожая, превышающем 15 %, применение адаптивных автоматических систем повышает производительность на 20 %.

Автоматизация контроля работы сельскохозяйственных машин

Системы автоматического контроля мобильных сельскохозяйственных агрегатов предназначены для постоянного контроля за выполнением отдельных технологических операций и подачи светозвуковой сигнализации водителю агрегата при технологических нарушениях или окончании операции.

В качестве контролируемых параметров технологических операций обычно выбирают:

- предельные уровни заполнения и опорожнения технологических емкостей;
- основные параметры рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов;
- пробуксовывание предохранительных муфт при перегрузках приводных органов;
- количество и качество продукции, получаемой агрегатом.

Наряду с системами контроля применяются системы автоматической защиты, которые при выходе контролируемого параметра

за заданные пределы отключают узел или систему механизмов во избежание аварии.

Обычно системы автоматической защиты снабжены системами автоматической сигнализации, информирующей водителя агрегата о срабатывании защитного устройства.

Системы автоматического контроля и защиты являются автоматизированными системами, которые не могут самостоятельно изменять ход технологического процесса. Причины, вызвавшие отклонение параметров технологического процесса, устраняет водитель агрегата. Такого рода системы являются разомкнутыми.

Проблема автоматизации посевных агрегатов включает четыре основных направления: контроль и автоматизация загрузки семенных ящиков сеялок, автоматический контроль высева семян, контроль и регулирование нормы высева семян, автоматическое регулирование глубины заделки семян.

Контроль нормы высева семян

Основной задачей, выполнение которой обеспечивает оптимальные условия для развития и роста растений, является равномерное распределение заданного количества семян на определенной площади или с заданным интервалом в рядке. Поэтому наиболее перспективным является определение нормы высева путем непосредственного подсчета количества высевающих семян.

На рис. 5.12 показано устройство с микропроцессором для измерения нормы высева семян.

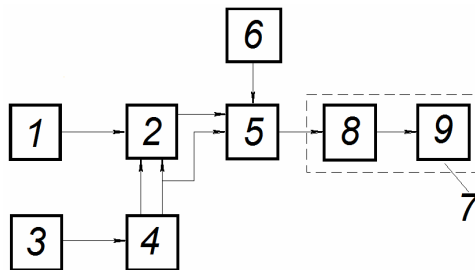


Рис. 5.12. Блок-схема устройства для измерения нормы высева семян

Принцип работы устройства основан на том, что норма высева пропорциональна числу семян, высеваемых за один оборот колеса

сеялки. Датчик высева 1 фиксирует каждое высеваемое семя. Количество импульсов датчика высева подсчитывается, считывается счетчиком семян 2. Датчик 3 фиксирует путь, пройденный сеялкой за один оборот колеса, и подает импульс на распределитель 4, на выходе которого формируется два импульса. По первому происходит считывание показания счетчика 2 семян в микропроцессор 5, а по второму – умножение показания счетчика семян в микропроцессоре 5 на константу задатчика 6, учитывающую вид высеваемой культуры и усреднение показаний с учетом трех предшествующих измерений, осуществляемое также микропроцессором 5. По второму импульсу происходит также обнуление счетчика семян. Полученное произведение расшифровывается в блоке сигнализации 7 дешифратором 8 и высвечивается цифровой лампой 9.

Применение устройства позволяет повысить культуру земледелия за счет повышения точности измерения нормы высева и облегчает труд тракториста.

Автоматический контроль и сигнализация работы зерноуборочной машины

Зерноуборочные машины оборудованы устройствами контроля функционирования рабочих органов с сигнализаторами (звуковыми, световыми). Сигнализатор загрузки комбайнов размещен над клавишным соломотрясом. Он выполнен в виде клапана, надетого на ось. На этой же оси установлена пружина, удерживающая его в исходном положении, при котором сигнализатор выключен.

При перегрузке толщина слоя массы на соломотрясе увеличивается. Под давлением соломы клапан поворачивается – и включается сигнальная лампа на щитке приборов. Сигнализатор загрузки предупреждает о неполадках в механизме соломотряса. При неполадках в его приводе толщина слоя соломы на соломотрясе увеличится, сработает устройство и включится сигнальная лампа на щитке приборов. Сигнализатор закрыт колпаком.

В зерноуборочных комбайнах предусмотрен контроль состояния многих узлов двигателя и рабочих органов. Все сигнальные линии выведены к щитку приборов. Таким образом, например, на щитках приборов комбайнов имеются 24–25 позиций, связанных с контролем состояния и режимов работы двигателя и рабочих органов, поэтому комбайнеру нелегко реагировать на поступающие сигналы.

В перспективных конструкциях зерноуборочных комбайнов предусматривается еще больше контролируемых (40 и более) параметров. Оснащение комбайнов большим числом систем контроля и управления с использованием ЭВМ требует сравнительно высоких дополнительных затрат.

На рис. 5.13 показана блок-схема одного из вариантов системы контроля комбайнов. В ней предусмотрены измерительные устройства частоты вращения 1 валов рабочих органов, намолота 2 и потерь 3 зерна, скорости движения 4 комбайна, уборанной площади 5, режимов работы двигателя 6 и других параметров технологического процесса.

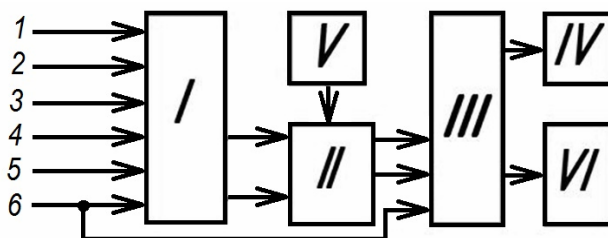


Рис. 5.13. Блок-схема системы контроля зерноуборочного комбайна

Сигналы с измерительных преобразователей поступают в блок I, где они кодируются в двоичную систему счисления. Далее, по заданной программе, информация фиксируется в микроЭВМ II, и по рассогласованиям с настроечными значениями параметров вырабатываются управляющие воздействия, которые передаются на исполнительные механизмы или на блок индикации.

Настроечные значения параметров заложены в блок V. После обработки данные поступают в устройство вывода III и далее на блок индикации IV или к исполнительным механизмам VI.

Блок индикации IV состоит из двух частей, работающих независимо одна от другой. Одна выводит цифровую индикацию на панель, другая – сигнализирует об отклонениях режимов работы. Формирование числовой и сигнальной информации и вывод ее на блок IV осуществляются по соответствующим алгоритмам.

На панели блока индикации размещены кнопки включения для измеряемых параметров и цифровые индикаторы, которые высвечивают

значения параметров в соответствующих единицах измерения. Кроме того, выведены кнопки сброса накопленной информации на нуль (например, количества намолоченного зерна, убранной площади). На панели имеются также рукоятки установки номинальных значений контролируемых параметров (высоты среза, настроечного значения подачи растительной массы, ширины захвата и др.) и предусмотрено место для динамика звукового сигнала.

Для семейства зерноуборочных комбайнов разработана на базе микроЭВМ типовая схема САУ ТП. Она состоит из подсистем контроля и управления. В первой предусмотрены блоки измерения частоты вращения валов рабочих органов и скорости движения комбайна, световой сигнализации (два блока по восемь каналов каждый), звуковой и световой сигнализации на шесть каналов, измерительных преобразователей.

Вторая включает взаимосвязанные автоматические устройства для регулирования высоты среза и загрузки молотилки растительной массой, а также частоты вращения мотовила. В эту подсистему входит и устройство автоматического вождения комбайна.

На зерноуборочных комбайнах установлена система автоматического контроля (рис. 5.14), которая включает блоки 5 измерения (БИЧ) и снижения (БСЧ) частоты вращения валов. В эти блоки поступает информация от датчиков 14–18 и 20 частоты вращения валов соломоизмельчителя, соломотряса, зернового шнека, колосового шнека, вентилятора и молотильного барабана.

В кабине комбайна размещен бортовой компьютер 1 вывода информации индикации потерь, частоты вращения валов. Информация о потерях поступает от пьезоэлектрических датчиков 7–10 потерь за соломотрясом и датчиков 11 и 12 потерь зерна за очисткой. Пьезоэлектрические датчики преобразуют кинетическую энергию падающих зерен в электрические сигналы и установлены в конце решет системы очистки и в клавишах соломотряса. Сигналы поступают в модуль потерь, который установлен на боковине комбайна возле гидроблока и предназначен для усиления электрических сигналов, поступающих с пьезоэлектрических датчиков, и формирования импульсов, обеспечивающих работу бортового компьютера.

В системе предусмотрен контроль давления масла и температуры воды, забивания фильтра гидросистемы, заполнения бункера

(датчики 3 и 4), забивания соломотряса (датчик 6), скорости движения комбайна (датчик 19).

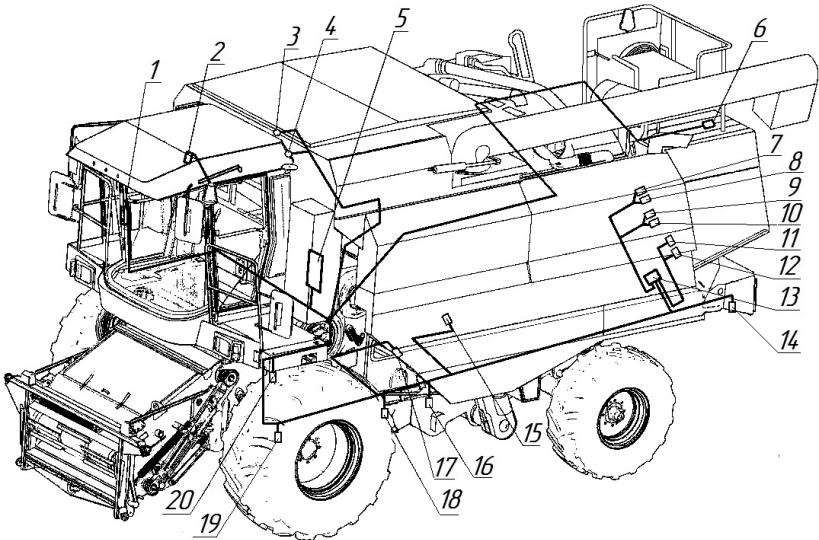


Рис. 5.14. Размещение датчиков системы контроля зерноуборочного комбайна:

- 1 – бортовой компьютер; 2 – датчик блокировки лаза в бункер;
- 3, 4 – указатели заполнения бункера зерна;
- 5 – модуль ввода-вывода или блок периферийный;
- 6 – датчик забивания соломотряса;
- 7, 8, 9, 10 – пьезоэлектрические датчики потерь зерна за соломотрясом;
- 11, 12 – пьезоэлектрические датчики потерь зерна за очисткой;
- 13 – устройство формирования импульсов или блок модуля потерь;
- 14 – датчик оборотов соломоизмельчителя; 15 – датчик оборотов соломотряса;
- 16 – датчик оборотов зернового шнека; 17 – датчик оборотов колосового шнека;
- 18 – датчик оборотов вентилятора; 19 – датчик скорости движения;
- 20 – датчик оборотов молотильного барабана;
- 21 – разъем для подключения системы мониторинга

БСЧ вращения 5 расположен в отсеке возле кабины и контролирует снижение частоты вращения валов восьми рабочих органов одновременно. Информация поступает от индуктивных датчиков. При снижении частоты вращения валов на 15 %–20 % номинальной БСЧ формирует сигналы, поступающие на бортовой компьютер.

5.6 Автоматизация процессов сушки, очистки и сортировки зерновой массы

Важнейшим продуктом сельского хозяйства является зерно. Из зерна вырабатываются важнейшие продукты питания: мука, хлебные и макаронные изделия, крупа и другие жизненно необходимые продукты питания. Зерновые служат сырьем для получения патоки, спирта и других продуктов. Зерно необходимо для успешного развития животноводства и птицеводства, обеспечивающих производство мяса и молока, масла и других продуктов. Поэтому увеличение производства зерна – одна из важнейших задач сельского хозяйства.

Производство зерна должно быть связано с повышением его качества, одним из главных показателей которого является влажность. По ней определяют начало уборки, устанавливают режимы обмолота, сушки и хранения зерна. Оперативный контроль влажности зерна необходим на всех этапах технологического цикла производства данного продукта.

Уборка зерна производится в стадии технологической спелости, когда ее влажность достигает 18 %–25 % и синтез питательных веществ еще незавершен. Полная физиологическая зрелость зерна, при которой наиболее полно выявляются ее биологические и семенные качества, наступает значительно позже, в период ее хранения.

Известно, что процессы синтеза при созревании зерна идут с выделением влаги, что приводит к возрастанию влажности зерновой массы и окружающего воздуха, а это, в свою очередь, может привести к самовозгоранию зерновой массы и потере ее семенных и питательных качеств.

Сушка зерна. Влажность зерна, поступающего на сушку, зависит от многих факторов. Различают четыре состояния зерна по влажности – сухое, средней сухости, влажное и сырое, которые определяют стойкость зерна при хранении.

При сушке масса зерна изменяется от начальной G_1 до конечной G_2 за счет испарения влаги, т. е.:

$$W = G_1 - G_2.$$

Для сушки зерна важны его теплофизические и физические свойства: теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, удельная поверхность, скважистость, сыпучесть, скорость витания зерна.

При сушке зерновая масса продувается воздухом или агентом сушки, что возможно благодаря скважистости зерновой массы. Чем выше скважистость, тем легче агент сушки подводится к зерновке и тем интенсивнее и равномернее протекает сушка.

Семенное зерно обычно нагревают до 40 °С, в то время как зерно продовольственного назначения выдерживает нагрев до 50 °С.

Сушильно-охладительная шахта имеет прямоугольное сечение и до верха заполняется просушиваемым зерном. Верхняя часть шахты – сушильная – предназначена для высушивания зерна, а нижняя – охлаждающая – для охлаждения высушенного зерна. Конструкция их аналогична. Сушильная часть шахты может разделяться на 2–3 секции – зоны сушки, – при этом в каждую зону подается агент сушки с различной температурой.

В качестве топлива в отечественных зерносушилках применяют газ, дизельное топливо, соляровое масло или тракторный керосин. Для сжигания жидкого топлива применяют форсунки инжекционного или игольчатого типа, а газообразного – газовые горелки.

Рециркуляционная сушка зерна предусматривает возврат части просушенного зерна в смеси с сырым зерном в надсушильный бункер. В надсушильном бункере проходят процессы тепловлагообмена между сырым и сухим зерном, в результате чего сырое зерно нагревается и частично подсушивается. Все это в конечном итоге приводит к значительной интенсификации процесса сушки. Шахтную зерносушилку любого типа достаточно просто реконструировать на рециркуляционный способ сушки, при этом производительность повышается на 30 %–50 %. Зерно, направляемое на сушку в шахтных прямоточных зерносушилках, формируют в партии по культурам, качеству, назначению и влажности. По влажности допускаются колебания до 2 % при влажности зерна до 19 % и до 4 % при влажности свыше 19 %. В первую очередь направляют на сушку партии более влажного зерна. Перед сушкой в шахтных зерносушилках зерно очищают от грубых и легких примесей, а в рециркуляционных – только от грубых. Температуру нагрева зерна регулируют как температурой агента сушки, так и временем пребывания зерна в сушилке (ее производительностью).

Для контроля процесса зерносушилки оснащаются специальными приборами – датчиками.

Для контроля заполнения надсушильного бункера в нем устанавливают датчики уровня зерна. Температуру агента сушки измеряют логометрами с термометрами сопротивления. Термометры сопротивления устанавливают в подводящих воздуховодах непосредственно перед сушильными зонами. Температуру нагрева зерна контролируют в нижнем ряду подводящих коробов сушильной зоны с помощью различных температурных датчиков или с помощью непосредственного измерения температуры пробы зерна, отобранной из-под этих коробов. Влажность зерна контролирует лаборатория, отбирая пробы каждые 2 часа, или с помощью поточных влагомеров, устанавливая их датчики на выходе зерна из сушилки.

При работе сушилки (рис. 5.15) обязательно определяют количество просушенного зерна. С этой целью на транспортных линиях устанавливают весы для взвешивания просушенного или сырого зерна.

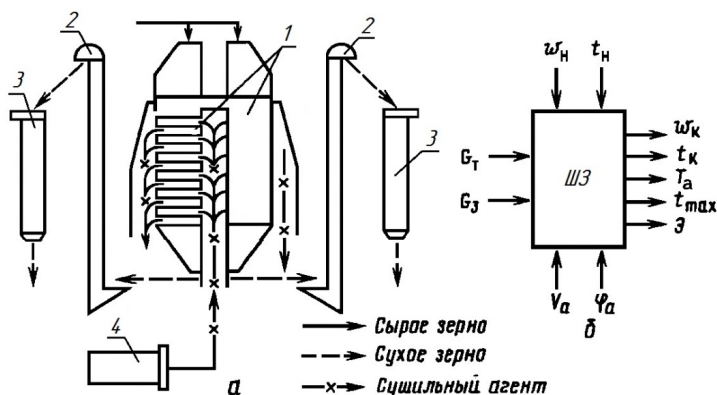


Рис. 5.15. Функциональная (а) и параметрическая (б) схемы шахтной зерносушилки:
 1 – шахты сушилки; 2 – нории; 3 – охлаждающие колонки;
 4 – теплогенератор; w_k и t_k – влажность и температура зерна на выходе;
 t_{max} – максимально допустимая температура зерна

Хранение зерна. Хранение зерна – особенно ответственный период в технологическом цикле производства зерна, требующий постоянного оперативного контроля влажности и температуры зерна, влажности и температуры воздуха в хранилище. Кроме того,

хранение зерна – длительный процесс, что предъявляет повышенные требования к контролю параметров зерна и воздуха в хранилище.

На сегодняшний день большинство хранилищ оборудовано лишь системами оперативного контроля температуры в различных точках хранимого объема зерновой массы. Используя информацию о температуре зерновой массы, оператор при необходимости включает систему вентиляции в хранилище и систему продува зерновой массы сухим воздухом. Таким образом, предотвращается самовозгорание зерна.

Недостаток такого управления вентиляцией заключается в том, что повышение температуры говорит об уже начавшемся саморазогреве зерновой массы.

В то же время известно, что наличие оперативной информации о влажности зерна позволяет прогнозировать возможный ее саморазогрев и возможность его предупредить.

Оперативное получение достоверной информации о влажности зерновой массы и относительной влажности воздуха в хранилище возможно лишь при применении систем автоматизированного контроля влажности, основанных на использовании надежных помехозащищенных датчиков влажности и современных программно-технических средств вычислительной техники.

Однако разработка указанных систем затруднена тем, что на современном рынке средств измерений отсутствуют надежные помехозащищенные закладные датчики сыпучих материалов и надежные недорогие гигрометры воздуха. Поэтому разработка надежных датчиков и систем автоматизированного контроля влажности на их основе является актуальной задачей.

Учитывая особую важность процесса хранения зерна, разработан ряд систем автоматизированного контроля влажности зерна и воздуха в хранилище. Функциональная схема одной такой системы приведена на рис. 5.16. Программно-техническое обеспечение автоматизированной системы контроля влажности включает в себя:

1. Модуль ввода аналоговый МВА8 – служит для связи и согласования датчиков с информационной сетью системы контроля.
2. Модуль интерфейсный RS-485 – обеспечивает необходимый протокол связи между МВА8 и информационной сетью системы контроля.
3. Адаптер сети ОВЕН АС3-М – обеспечивает связь компьютера оператора с информационной сетью системы контроля.

4. ПК – компьютер оператора.
5. ОВЕН ТРМ133, ОВЕН ПЛК – логические устройства обработки измерительной информации.

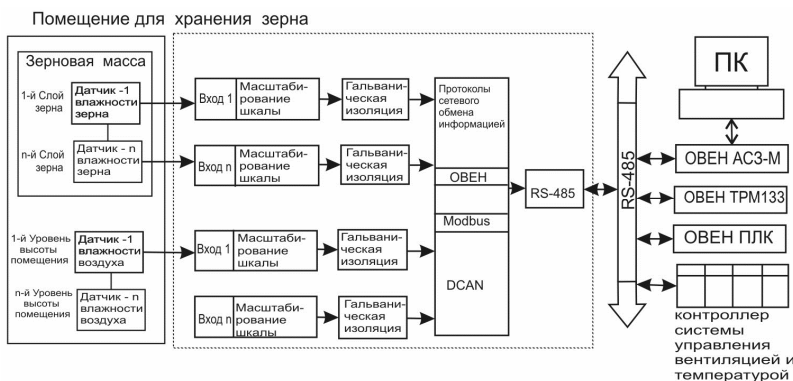


Рис. 5.16. Система автоматизированного контроля влажности зерна и относительной влажности воздуха в хранилище

Применение разработанной системы автоматизированного контроля влажности зерна и воздуха в хранилище позволяет повысить сохранность зерна при небольших материальных затратах.

5.7 Автоматизация процессов активного вентилирования зерна

Технология хранения сельскохозяйственной продукции включает в себя процессы подогрева, охлаждения и увлажнения для предохранения продукции от переохлаждения, самосогревания и обезвоживания.

Жизнедеятельность зерна при хранении проявляется в его дыхании, следствие которого – потери сухих веществ и повышение влажности зерна и межзернового пространства, увеличение температуры зерновой массы (самосогревание). Исходя из этого интенсивность дыхания при хранении зерновой массы следует свести к минимуму, но без ухудшения качества продукта.

Интенсивность дыхания резко увеличивается с повышением влажности зерна, поэтому на хранение надо закладывать зерно с влажностью ниже критической (ниже 14 %...15,5 %). Оптимальный температурный диапазон хранения для семенного зерна 0 °С...10 °С.

Целевая функция управления процессом хранения – минимизация потерь массы зерна

$$\Pi = f(t_3, w_3, B_3, t) \rightarrow \min$$

при соответствующих ограничениях по качественным показателям продукта (температура t_3 не выше, а всхожесть B_3 не ниже заданной).

Алгоритм оптимального управления процессом хранения семян в соответствии с целевой функцией предусматривает контроль температуры t_3 , влажности зерна w_3 , его всхожести B_3 и чистоты t .

Температуру зерна в хранилищах закромного типа контролируют вручную при помощи термометров и термощтанг, погружаемых в различные места закрома. Остальные параметры также контролируют периодически с отбором проб и их анализом в лаборатории.

В современном варианте информация поступает от датчиков, установленных в разных точках насыпи и на разной глубине (рис. 5.17), анализируется микропроцессорным устройством, которое при выявлении очага самосогревания зерна включает ближайший вентилятор, убедившись предварительно, что температура наружного воздуха достаточно низка.

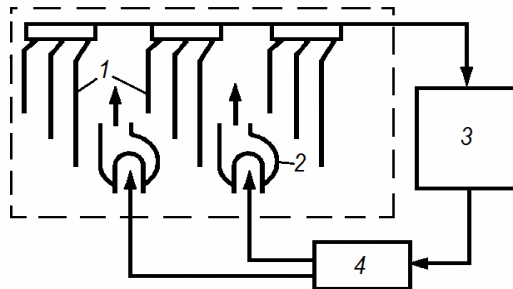


Рис. 5.17. Микропроцессорная система управления режимом хранения зерна:
1 – термоподвеска; 2 – вентилятор; 3 – вычислительное устройство;
4 – пульт управления

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите основные элементы силового регулирования глубины пахоты.

2. Что является задающим устройством в схеме автоматического корректора глубины хода сошников?

3. Назначение вихревого дросселя автоматического корректора глубины хода сошников.

4. Что является воспринимающим органом при силовом регулирования глубины пахоты?

5. Что является исполнительным механизмом на кормоуборочных машинах?

6. Назовите основные элементы САВ зерноуборочного комбайна.

7. Какую функцию выполняет датчик обратной связи в САВ зерноуборочного комбайна?

8. Что является воспринимающим органом системы автовождения агрегата с колесным трактором вдоль борозды?

9. Что является исполнительным механизмом электрогидравлического автомата вождения самоходного свеклоуборочного комбайна?

10. Назовите основные элементы САР загрузки двигателя внутреннего сгорания.

11. Какую функцию выполняет актуатор загрузки двигателя внутреннего сгорания?

12. Назначение золотникового распределителя в САР загрузки двигателя внутреннего сгорания.

13. Что является воспринимающим органом гидромеханического регулятора загрузки зерноуборочного комбайна?

14. Что является исполнительным механизмом гидромеханического регулятора загрузки зерноуборочного комбайна?

15. Назовите основные элементы блок-схемы устройства контроля работы сеялок.

16. Какую функцию выполняет фотопреобразователь блок-схемы устройства контроля работы сеялок?

17. Назначение счетчика семян блок-схемы устройства контроля работы сеялок.

18. Назначение микропроцессора блок-схемы устройства контроля работы сеялок.

19. Какие функции выполняет блок индикации зерноуборочного комбайна?

20. Назовите основные параметры регулирования при послеуборочной обработке зерна.

21. Какие датчики применяются для определения влажности при хранении зерна?

6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И ПТИЦЕВОДСТВЕ

6.1. Автоматизация кормления, поения и взвешивания животных

Индивидуальная раздача кормов, особенно концентрированных, имеет большие преимущества, такие как экономный расход корма и увеличение продуктивности животных на 10 %–15 %. Наиболее распространена индивидуальная раздача кормов на доильной площадке.

Существуют также системы раздачи кормов в коровниках с использованием специальных автоматических кормовых станций. Управление этими системами может быть ручное, программное или автоматическое. Системы дозирования кормов в местах содержания животных рекомендуются для высокопродуктивных коров. С помощью автоматической кормовой станции можно организовать выдачу концентрированных кормов небольшими дозами в течение суток, когда животное само подходит к кормушке (кормовой станции).

Индивидуальная раздача кормов требует выполнения ряда условий: идентификация животного, измерение его продуктивности и наличие управляемого дозирующего устройства.

Автоматическую идентификацию животных осуществляют с помощью радиотехнического устройства – датчика, закрепляемого в ухе или на специальном ошейнике (рис. 6.1, а).

Автоматическое дозирование корма. В зависимости от уровня автоматизации процесса дозирования управление дозаторами может быть ручное, полуавтоматическое или автоматическое. При ручном управлении процессом дозирования командует оператор. При полуавтоматическом дозировании оператор использует счетчики порций, устройства для подачи корма в дозатор и другие вспомогательные механизмы. При полной автоматизации процесса дозаторы работают по разомкнутому циклу, выполняя функции ИМ, отмеряющих заданное количество корма независимо от изменения его параметров, или по замкнутому циклу, когда изменение выдачи материала происходит в соответствии с командой регулирующего устройства. Конструкция дозаторов зависит от вида дозируемого корма. Для дозирования сухих рассыпных кормов применяют барабанные, тарельчатые, ленточные и шнековые дозаторы.

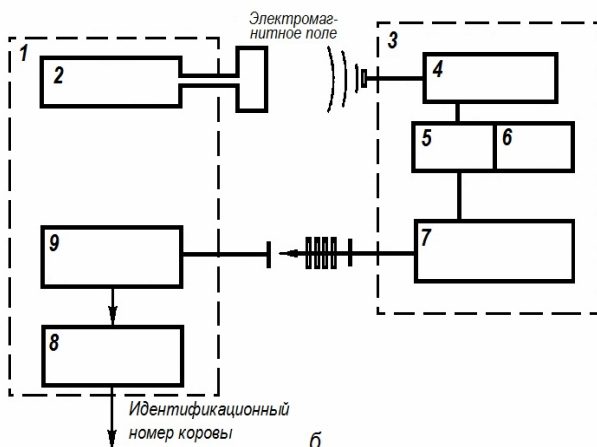
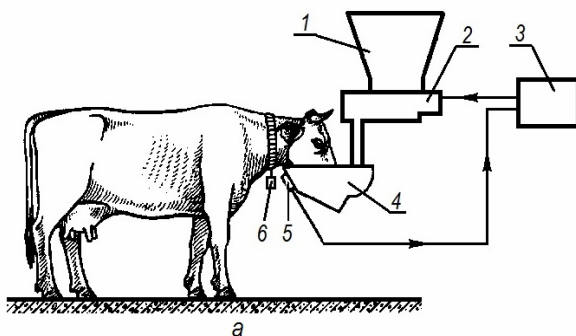


Рис. 6.1. Автоматизированная система индивидуального кормления коров (а) и функциональная схема автоматического распознавания животных (б):
 а: 1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – микроЭВМ; 4 – кормушка;
 5 – приемно-передающее устройство; 6 – транспондер;
 б: 1 – идентифицирующее устройство; 2 – генератор; 3 – транспондер;
 4 – приемное устройство; 5 – генератор; 6 – блок памяти; 7 – передающее устройство;
 8 – декодирующее устройство; 9 – приемное устройство

6.2. Автоматизация машинного доения коров

Значительная трудоемкость процесса доения, неуклонно повышающиеся требования к качеству молока и высокая оплата труда наемных работников в большинстве развитых стран стимулировали инвестирование в изучение и производство высокотехнологичного

и наукоемкого оборудования для молочных ферм. Работы по изучению и внедрению полной автоматизации процесса доения были начаты еще в 50-х гг. XX в. В 70–90 гг. целый ряд институтов в Европе работал над задачей определения правильного положения сосков, разрабатывая устройство для автоматического надевания доильных стаканов.

Научные разработки доильных роботов практически одновременно начали такие известные производители доильного оборудования, как Lely Industries N. V. (Нидерланды), Gascoigne Melott (позже вошла в состав компании Vou-Matic, США), Insentec (Нидерланды) и др. Первый экспериментальный образец автоматизированного доильного устройства был представлен в 1984 г., коммерческий в 1992 г. (в Нидерландах). Однако разработка принципиальной концепции доильных роботов осложнялась тем, что, в отличие от промышленных роботов, имеющих дело с неодушевленными объектами, они должны были взаимодействовать с живыми организмами, которым присуща вариабельность. Реализация идеи стала возможной только после создания достаточно чувствительных сенсоров, анализаторов и соответствующего программного обеспечения для компьютера – интегральной части автоматической доильной системы. Помимо непосредственного доения, роботы должны были взять на себя еще целый ряд операций, выполняемых ранее операторами и работниками различных лабораторий.

Резкий рост спроса на доильные автоматизированные системы пришелся на конец 90-х гг. В настоящее время в мире установлено около 30 тыс. роботизированных систем, из них около 15 тыс. компании Lely, 10 тыс. – DeLaval.

Наибольшее распространение системы добровольного доения получили в Европе, особенно популярны роботы в Бельгии и Голландии. Высокий уровень заработной платы при одновременном дефиците рабочих стимулирует продажи роботов. Следует отметить, что подавляющее число роботизированных ферм имеют поголовье от 50 до 200 животных, то есть это семейные фермы, а не промышленные комплексы.

Принципы работы автоматических доильных систем. Роботы для автоматизированной системы доения выполняют множество функций, которые ранее частично выполнялись доярками:

– подготовка вымени к доению;

- подключение доильного аппарата к соскам;
- измерение показателей молока и удоя;
- своевременное снятие доильных аппаратов;
- дезинфекция сосковой резины;
- подсчет количества шагов коровы после последней дойки (коровы в охоте);
- подача сигналов для селекционных ворот для выборки проблемных коров и т. п.

Рассмотрим принцип действия автоматических доильных систем на примере доильного робота Astronaut фирмы Lely (рис. 6.2).

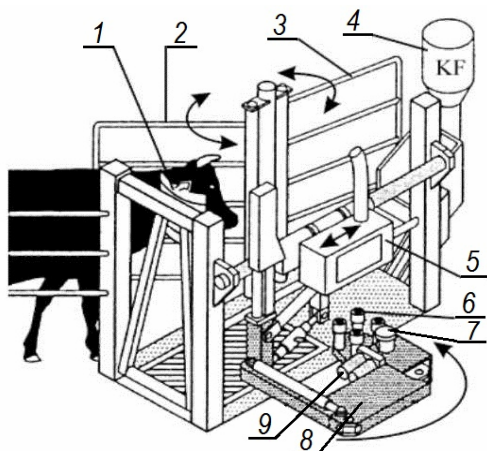


Рис. 6.2 Схема доильного робота Astronaut:

- 1 – манипулятор позиционирования животного; 2 – входная дверца;
- 3 – выходная дверца; 4 – автоматическая кормораздаточная станция;
- 5 – блок регулирования перемещения руки; 6 – доильные стаканы;
- 7 – лазерные датчики; 8 – рука робота; 9 – ролики обмыва вымени

Доильный робот Astronaut фирмы Lely состоит из доильного бокса с размерами 4,5×2,5×2,5 м. При входе коровы в бокс происходит ее идентификация, и компьютер определяет: необходимо ли немедленно доить корову либо выпускать ее из бокса. Если необходимо доить корову, то в кормушку выдается порция 1,5–2,5 кг концентрированного корма. Движение животного сзади ограничивается специальным манипулятором 1. Примерно через 10 с после

позиционирования коровы рука 8 робота захватывает устройство 9 для обмыва вымени с двумя роликами, покрытыми хлопчатобумажной тканью, увлажненной водой, и подводит под вымя животного. Определяется место расположения сосков и начинается процесс их очистки вращающимися в разные стороны роликами. После очистки рука робота отводит ролики в специальную выемку, где происходит их промывка водой и обеззараживание дезинфицирующими растворами.

Рука робота снова подводится под корову, но уже с доильным аппаратом 6 и с помощью лазера 7 начинается его позиционирование. Для позиционирования в качестве точки отсчета служат передние соски, по окончании позиционирования робот начинает последовательно надевать доильные стаканы на соски, начиная с задних четвертей вымени. При этом подвижная тестовая плита передает движение коровы с помощью ультразвукового датчика руке робота, которая повторяет движения коровы. При неудачной попытке надеть доильные стаканы робот делает еще две дополнительные попытки. При неудачной третьей попытке робот выпускает корову, выдает звуковой сигнал и сообщение на дисплей компьютера. Первые струйки молока сдаиваются в специальный резервуар. Количество надоенного молока и его электропроводность из каждой четверти вымени животного поступает по отдельному молокопроводу. Доильные стаканы снимаются с каждого соска вымени отдельно, по мере прекращения из него молокоотдачи.

Роботы разных компаний, как правило, конструктивно схожи и состоят из следующих составных частей: станочного оборудования с воротами и станцией кормления (бокса), руки-манипулятора с системой определения положения сосков (включает в себя систему очистки сосков и вымени), доильных аппаратов, систем управления доением и регистрации качества молока, системы менеджмента стада. В систему входят сенсорные и контрольные приборы, специальные весы, чтобы взвешивать корову, концентраты и молоко. Неотъемлемой частью робота можно считать также молокоохладитель, так как холодильное оборудование, применяемое в доильных залах, не подходит для использования на роботизированных фермах. К молокоохладителю может быть подключено до 8 роботов. На сегодняшний день доильные установки отличаются между собой, главным образом, числом одновременно обслуживаемых коров.

Достоинства и недостатки автоматизированных доильных систем. Рассмотрим вначале преимущества:

1. Быстрое привыкание к доению роботом и самостоятельное посещение доильного бокса обеспечивают увеличение частоты доений животных (у высокопродуктивных коров – до 4-х раз и более в сутки), что благотворно сказывается на здоровье вымени животного и способствует повышению продуктивности до 15 %.

2. Значительное сокращение затрат труда на доение.

3. Постоянный контроль качества молока и контроль здоровья животных.

4. Снижение стрессовой нагрузки на животных.

5. Возможность создания гибкой системы менеджмента стадом.

Следует также сказать и о недостатках, а вернее, о специфических особенностях эксплуатации роботизированных доильных установок, которые надо обязательно учитывать при принятии решения о выборе той или иной системы.

1. Необходимость тщательного подбора животных. Проблема в том, что далеко не все коровы пригодны к доению роботами. Практика показывает, что при переходе от «традиционного» доения к роботизированному выбраковывается до 15 % коров из-за неправильных размеров и формы вымени или сосков.

2. Вымя каждой коровы должно быть чистым и ухоженным для обеспечения корректной работы датчиков манипулятора. Это накладывает дополнительные требования к содержанию животных, начиная с этапа проектирования помещения новой или реконструируемой фермы и заканчивая наличием на ферме оборудования для выжигания волосков вымени и специалистом, способным его применять.

3. Сложность зачастую даже в невозможности выпасать животных. Несмотря на то, что в перспективе запланировано переводить скот на безвыпасное содержание, в настоящее время очевидно, что без дешевых кормов, получаемых на пастбищах в летнее время, обойтись практически невозможно.

4. Высокая технологичность оборудования предъявляет повышенные требования к квалификации персонала. Центров, предлагающих обучение работников сельскохозяйственных организаций обслуживанию доильных роботов, нет.

5. Высокая стоимость оборудования.

6.3. Автоматизация первичной обработки молока

К первичной обработке молока относятся охлаждение, пастеризация, очистка и удаление механических и частично бактериальных примесей. Для охлаждения молока применяются специальные аппараты – молочные охладители. По конструкции они могут быть открытые и закрытые, противоточные и параллельноточные, трубчатые и пластинчатые. В качестве хладагента применяются вода и рассол. Противоточные охладители рассчитаны на охлаждение молока до температуры, превышающей на 3 °С начальную температуру охлаждающей жидкости.

При пастеризации молоко нагревают до 63 °С–93 °С. Для длительной пастеризации применяют ванны длительной пастеризации типа ВДП различной вместимости. Кратковременную пастеризацию проводят в паровых пастеризаторах с вытеснительным барабаном и в пластинчатых аппаратах с обогревом горячей водой.

Пластинчатые пастеризаторы не имеют движущихся деталей. В них теплообмен происходит между потоками горячей воды и молока, разделенными тонкими пластинами из нержавеющей стали. Между пластинами протекают в противоположном направлении вода и молоко. Водяной и молочный насосы создают необходимый для движения напор.

В автоматизированных установках ОПФ-1, ОПУ-3М, ОПУ-5М применяют комбинированные пастеризатор, теплообменник-регенератор и охладитель, собранные из одинаковых по конструкции пластин на одной станине.

Для удаления механических примесей применяется сепаратор-молокоочиститель, приводимый в движение от электродвигателя.

Автоматизированные установки первичной обработки молока состоят из центробежного молокоочистителя, пластинчатых пастеризатора, теплообменника-регенератора и охладителя.

Качество первичной обработки молока определяется точностью выполнения режима пастеризации и охлаждения молока. Технологические требования относительно температурного режима предусматривают допустимое отклонение температуры нагрева и охлаждения до ± 2 °С, а погрешность регистрации температуры – 1 °С. Динамическое отклонение температуры нагрева и охлаждения

молока от заданных значений во время работы автоматических систем регулирования должно быть в пределах ± 2 °С. Превышение температуры над заданной при выходе установки на режим не должно быть более 5 °С.

Рабочий процесс первичной обработки молока на установке ОПФ-1 рассмотрим по схеме автоматизации, показанной на рис. 6.3.

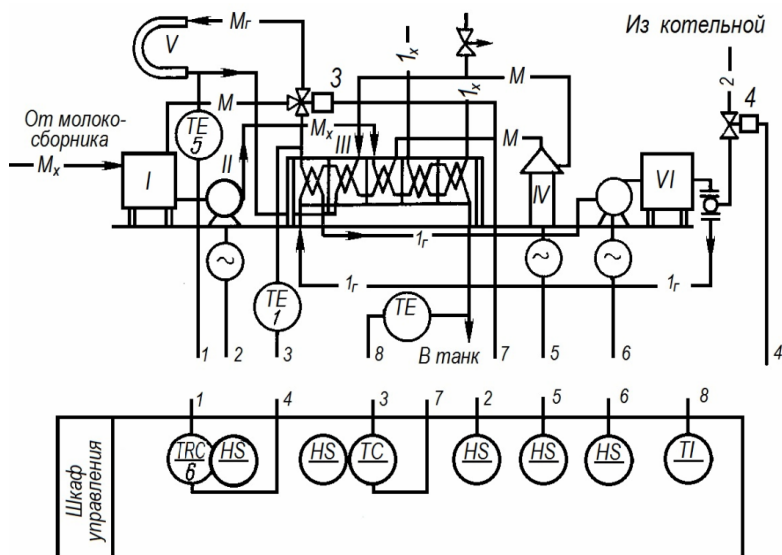


Рис. 6.3. Схема автоматизации установки ОПФ-1

Из молокосборника молоко поступает в уравнительный бак 7. Из бака I насос II подает молоко в первую секцию III пластинчатого аппарата (секцию регенерации), где молоко за счет теплообмена нагревается до 37 °С–40 °С. Из первой секции регенерации молоко поступает в молокоочиститель IV, очищается, подается во вторую секцию регенерации и переходит в секцию пастеризации, где за счет теплообмена с горячей водой нагревается до температуры +76 °С (в установке ОПФ-1-20) или до +90 °С (в установке ОПФ-1-300). Пастеризованное молоко через выдерживатель V проходит в секции регенерации, и его температура снижается до +20 °С ...25 °С. Затем молоко проходит секции охлаждения, где его температура снижается до +5 °С ...8 °С. Холодное молоко поступает в танки.

Горячая вода готовится в бойлере *II*, где нагревается паром через инжектор паропровода от котельной установки.

Дополнительная выдержка молока в течение 20 с в выдерживателе установки ОПФ-1-20 и 300 с в выдерживателе установки ОПФ-1-300 перед охлаждением способствует уменьшению бактериальных загрязнений.

Контроль температуры молока после пастеризационной секции осуществляется первичным преобразователем *1*, сигнал которого подается на регулятор *2*, формирующий сигнал исполнительному механизму *3* трехходового клапана, который при низкой температуре молока перепускает его обратно в уравнильный бак.

Температура молока после выдерживателя контролируется преобразователем *5*, сигнал которого подается на регулятор *6*. Исполнительный механизм *4* управляет вентилем подачи пара в бойлер для изменения температуры воды.

Для выбора наиболее рациональных схем автоматического управления установкой проводят ее исследование с целью получения математического описания установки как объекта автоматизации. Определение статических и динамических характеристик позволяет выбрать наиболее эффективные регуляторы и параметры их настройки.

Процесс пастеризации и охлаждения молока можно представить структурными схемами, показанными на рис. 6.4. Входная величина секции пастеризации – расход пара G_p , а выходная – температура молока $\theta_{мп}$. Возмущениями являются непостоянство расхода молока G_m , его температура, изменение коэффициента теплопередачи пастеризатора вследствие отложения белка на теплопроводящих поверхностях. Входная величина секции охлаждения – расход хладоносителя $G_{хл}$, а выходная – температура холодного молока $\theta_{мх}$. Основными возмущениями в охладителях молока являются колебания температуры хладоносителя, изменение давления хладоносителя $p_{хл}$, расхода молока G_m и др.

Температуру нагревания молока можно изменять при помощи позиционного и непрерывного регулирования. В пластинчатых пастеризационно-охладительных установках применяются ПИ-регуляторы, обеспечивающие высокую точность регулирования температуры. В установках ОПФ-1 для регулирования температуры

воды используется электронный регулятор ЭР-СС-63 с термометром сопротивления. Исполнительным механизмом в системе регулирования является электрогидравлический клапан. Он снабжен электромагнитом для управления клапаном пропуска воды, которая под давлением действует на мембрану, соединенную штоком с золотником, перекрывающим канал выпуска пара через инжектор в систему циркуляции горячей воды.

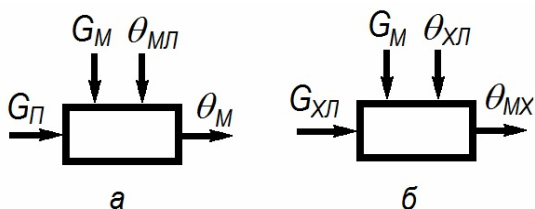


Рис. 6.4. Структурные схемы:
а – пастеризация молока; *б* – охлаждение молока

В установках ОПУ-3М, ОПУ-5М для контроля и регулирования температуры нагревания и охлаждения молока применяются самопишущие мосты типа МСП1-05 с пределами измерения от 0 °С до 100 °С. Первичные преобразователи – термометры сопротивления типа ТСП-864. Мосты снабжены реостатными задатчиками, которые совместно с балансными реле типа БР-3 и реостатами обратной связи электрических исполнительных механизмов типа ПР-М регулирующих клапанов, реализуют пропорциональный закон регулирования.

В установке ОПФ-1 температура охлажденного молока контролируется логометром с термометром сопротивления типа ТСМ 8.

Температура молока в пастеризационной секции контролируется и регистрируется самопишущим мостом типа МСП 1-01 с термометром сопротивления типа ТСП. Мост имеет контакты, которые при снижении температуры молока ниже заданной замыкаются, и в цепи исполнительного механизма трехходового клапана подается напряжение. При этом клапан входа воды в гидрореле закрыт и мембрана с ее клапанным устройством находится в верхнем положении, перекрывая выход молока в выдерживатель и направляя его обратно в уравнивательный бак. Когда температура молока достигает заданной, контакты моста размыкаются, ток

в катушке электромагнита прерывается, и под действием пружины шток опускается и открывает доступ воде в гидрокамеру клапана. Вода под давлением действует на мембрану и перемещает клапанный механизм в нижнее положение. При этом молоко поступает из пастеризатора в камеру выдерживания.

Управление двигателями насосов и центрифуги ручное, при помощи кнопок и магнитных пускателей. Аппаратура управления, регулирования и контроля расположена в шкафу управления. На переднюю панель шкафа вынесены приборы и ключи управления, электронный мост, регулятор, логометр и сигнальные лампы.

В ручном режиме установку ОПФ-1 запускает оператор. Перед пуском он проверяет состояние пакета пластин, соединения, направление вращения барабана сепаратора. Затем в уравнивательный бак заливает содовый раствор и включает насосы в работу. Включает пар и в течение 15 мин промывает систему. После этого заливает холодную воду для вытеснения содового раствора и в течение 30 мин промывает систему горячей водой. После стерилизации системы переключает ее в автоматический режим. Сначала подает молоко в уравнивательный бак, включает сепаратор и после установления рабочей частоты вращения включает насосы подачи молока и горячей воды. После срабатывания перепускного клапана установка переходит в рабочий режим. Через 2,5–3,0 ч работы установку останавливают для удаления грязи из сепаратора-очистителя. Остановку осуществляет оператор в ручном режиме, выполняя необходимые операции в требуемой последовательности, определяемой инструкцией.

6.4. Автоматическое управление микроклиматом в животноводческих помещениях

Условия содержания животных имеют большое значение для здоровья и продуктивности животных. Естественные условия окружающей среды не всегда могут обеспечить необходимый микроклимат в помещениях. Использование специализированного оборудования для обеспечения микроклимата получило широкое распространение на птицефабриках, свинофермах и фермах крупного рогатого скота.

Автоматизированная система управления микроклиматом представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для поддержания комфортных климатических условий в животноводческих помещениях.

Такие системы управления микроклиматом позволяют управлять заслонками воздуховодов, регулировать скорость приточного воздуха, скорость воздуха внутри помещения, регулировать температуру и влажность воздуха, задавая различные режимы работы исполнительным устройствам, реагировать на аварийные и внештатные ситуации, осуществлять запись в журнал событий эксплуатации и сигнализации, а также имеют возможность дистанционного управления посредством беспроводных и мобильных сетей.

При проектировании коровников обеспечение необходимого воздухообмена осуществляется за счет естественной вентиляции через конек в крыше, вентиляционные шахты и оконные проемы, боковые проем и т. п.

В теплый и жаркий периоды времени дополнительно может использоваться принудительная система вентиляции, как местная, так и общеобменная. Известно, что при температуре воздуха выше 25 С внутри коровника происходит снижение молочной продуктивности.

Для снижения тепловых стрессов коров в теплый период времени применяются различные варианты местной принудительной вентиляции, например, потолочные вентиляторы и наклонные вентиляторы различных конструкций, в том числе с распылением воды. Они предназначены для увеличения воздухообмена в помещении и обдува животных. Используемые для этих целей стационарные вентиляторы обеспечивают подачу потока воздуха в постоянном направлении в зоны кормления или отдыха.

При автоматизации системы вентиляции в помещениях для крупного рогатого скота особое внимание следует уделять показателям температуры воздуха, относительной влажности воздуха, скорости воздуха и концентрации вредных газов. Чтобы создать комфортные условия микроклимата в коровниках автоматизированная система должна учитывать вышеперечисленные параметры. Для этого используются датчики температуры воздуха, относительной влажности воздуха, концентрации газов (аммиака, сероводорода, углекислого газа и т. д.).

Принципиальная схема автоматизированной системы вентиляции коровника представлена на рис. 6.5.

Блок управления микроклиматом программируется исходя из требований, которые позволяют поддерживать оптимальный микроклимат в зависимости от количества животных, способа содержания, размеров помещения, показателей внешней среды.

Использование подобных автоматизированных систем управления позволяет оперативно воздействовать на микроклимат помещения, что обеспечивает снижение возможных потерь продукции.

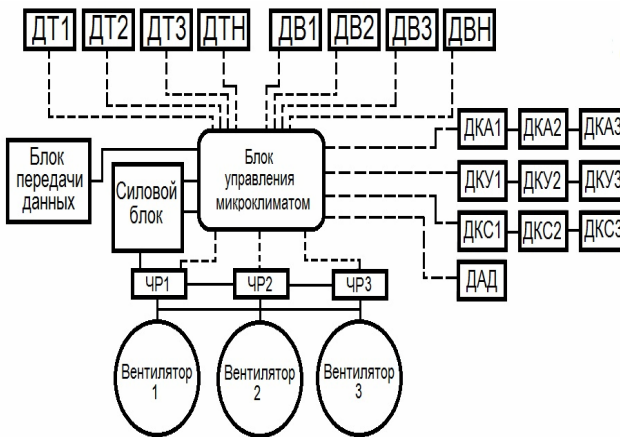


Рис. 6.5. Принципиальная схема автоматизированной системы вентиляции коровника:

- ДТ1-3 – датчики температуры воздуха в помещении,
- ДТН – датчик температуры наружного воздуха,
- ДВ1-3 – датчик относительной влажности воздуха в помещении,
- ДВН — датчик относительной влажности наружного воздуха,
- ДКА1-3 – датчики концентрации аммиака в помещении,
- ДКУ1-3 – датчики концентрации углекислого газа в помещении,
- ДКС1-3 – датчики концентрации сероводорода,
- ДАД – датчик атмосферного давления,
- ЧР1-3 – частотные преобразователи вентиляторов

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какую функцию при автоматическом дозировании кормов выполняет загрузочный механизм (питатель)?

2. Как осуществляется автоматическая идентификация животных при индивидуальном кормлении?
3. Назовите фирмы, занимающиеся разработкой доильных роботов.
4. Чем обусловлена необходимость разработки доильных роботов?
5. В чем преимущества и недостатки доильных роботов?
6. Какова погрешность регулирования температуры при пастеризации молока?
7. Какое автоматическое устройство управляет работой доильного аппарата?
8. Какие параметры характеризуют микроклимат животноводческих помещений?

7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

7.1. Автоматическое управление микроклиматом в теплицах

В основе управления микроклиматом в теплицах лежит контроль и управление температурой и влажностью воздуха и концентрацией в нем углекислого газа CO_2 .

Все данные о состоянии и динамике микроклимата в теплицах периодически передаются из управляющего контроллера в персональный компьютер диспетчера. Соединение производится двухпроводной линией по интерфейсу RS-485. Программа для персонального компьютера обеспечивает текущее ежеминутное наблюдение всех параметров, сигнализацию о выходе параметра за установленные допуски и архивирование данных для последующего просмотра и анализа. Управляющий контроллер определяет средние значения температуры и влажности воздуха за сутки и сохраняет эти данные в своей памяти.

Микроклимат теплиц программируется на сутки либо с персонального компьютера диспетчера, либо с пульта управляющего контроллера. В программе контроллера на сутки задаются дневные и ночные режимы микроклимата и динамика переходов между ними. Заданный в программе режим микроклимата может автоматически корректироваться в зависимости от интенсивности солнечного излучения. В процессе работы контроллер согласно заданной программе с учетом внешних условий (солнечного излучения, внешней температуры, скорости и направления ветра) производит согласованное регулирование температуры теплоносителя в контурах обогрева, управляет положением форточной вентиляции, защитного экрана, режимами работы воздушными вентиляторами и т. д. Управление ИМ производится через отдельный блок релейной коммутации (БРК).

В процессе эксплуатации для каждой конкретной теплицы должна быть возможность оптимизации качества регулирования микроклимата путем корректировки с помощью набора регулировочных параметров управления.

Структурная схема комплекса приведена на рис. 7.1. Управление комплексом производится электронным блоком, который включает в себя непосредственно управляющий контроллер, интерфейсную часть и органы индикации и управления. В интерфейсной части находятся схемы измерения для аналоговых и дискретных датчиков.

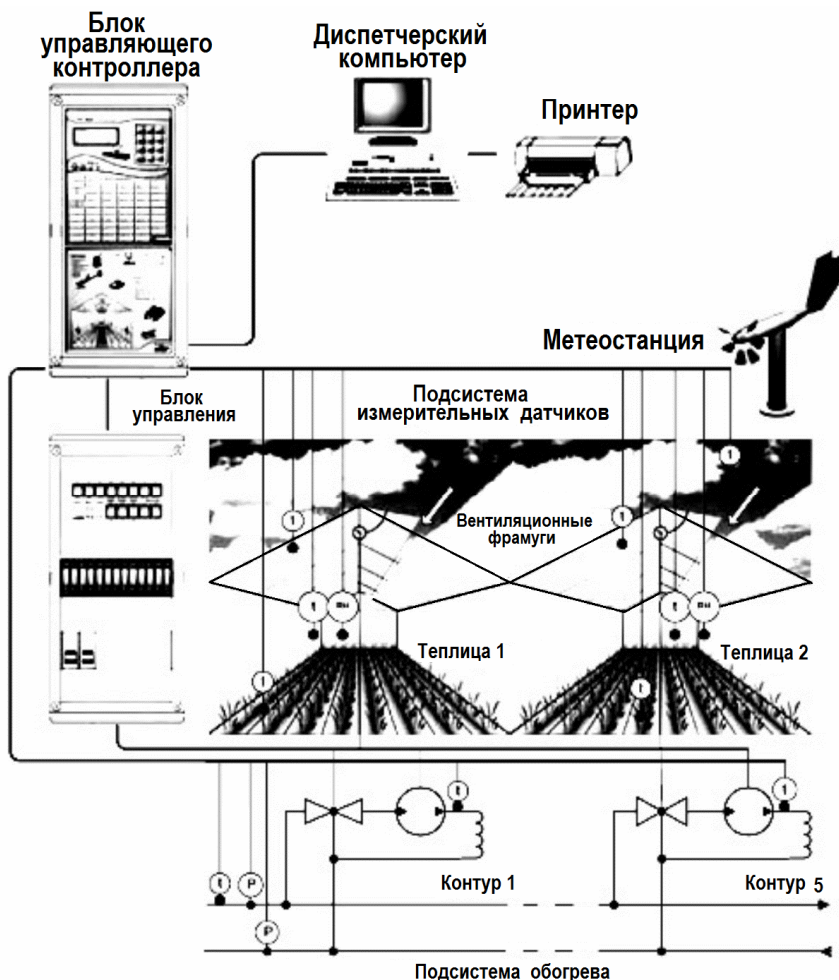


Рис. 7.1. Структурная схема комплекса (вариант двух теплиц)

В отдельном блоке релейной коммутации расположены релейные ключи для автоматического и ручного управления исполнительными механизмами: насосами, смесительными клапанами, приводами форточной вентиляции, редукторами и т. д., а также светодиодные индикаторы для отображения режимов работы исполнительных механизмов.

Измерение температуры и влажности воздуха в теплицах производится соответственно как аналоговыми датчиками температуры, так и с помощью однопроводных цифровых термометров и высокоточных датчиков относительной влажности, помещенных в общую вентилируемую ячейку для повышения точности и стабильности измерений. Измерения температуры стекла, почвы, внешнего воздуха и теплоносителя в контурах обогрева производится аналогично как аналоговыми датчиками температуры, так и с помощью однопроводных цифровых термометров. Концентрация CO_2 в воздухе производится датчиками состава воздуха.

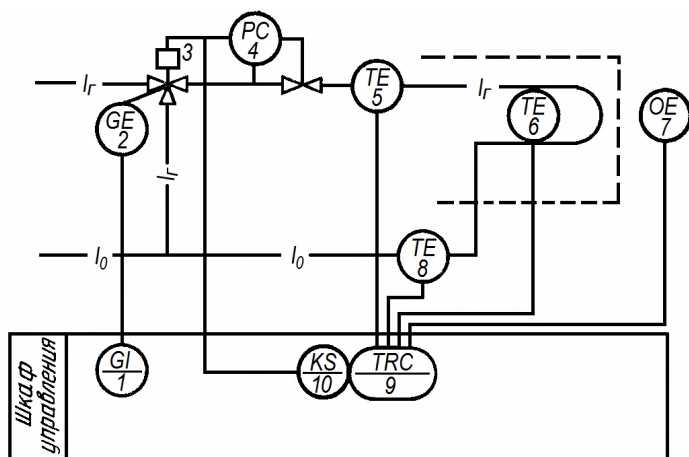
Для регулирования различных параметров в теплицах применяются непрерывное и позиционное регулирование. Например, для поддержания температуры воздуха в теплице применяют пропорциональное или пропорционально-интегральное регулирование для водотрубных систем отопления и позиционное для калориферного и электрического обогрева.

Функционально-технологическая схема регулирования температуры при водотрубном обогреве показана на рис. 7.2, а.

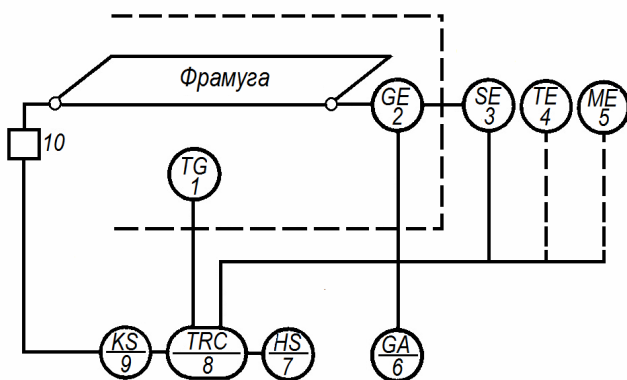
В системе регулирования используются преобразователи температуры воздуха 6, температуры горячей воды 5 и температуры воды в обратном трубопроводе 8 и преобразователь освещенности 7. Регулятор 9 управляет при помощи исполнительного механизма 3 трехходовым клапаном, изменяя количество теплоносителя, подаваемого в систему. Регулятор давления 4 стабилизирует давление воды в трубах. Реле времени 10 задает температуру в ночное и в дневное время суток. Для контроля положения вентиля используются первичный преобразователь положения 2 и вторичный прибор 1. Предусматривается регистрация температуры в теплице.

Первичные преобразователи температуры монтируют внутри тепличного блока. Электронный регулятор формирует управляющий сигнал, который воздействует на электрический исполнительный механизм, изменяющий положение трехходового клапана. Регулятор

совместно с исполнительным механизмом формирует ПИ-закон регулирования, а с внешним дифференциатором (блоком предварения) – ПИД-закон регулирования.



Примечание: O - солнечная радиация
а



б

Рис. 7.2. Функционально-технологические схемы:
а – регулирования температуры в теплице;
б – управления естественной вентиляцией в теплице

Автоматическое управление вентиляцией. Системы вентиляции предназначены для отвода теплоты из теплицы путем замещения

воздуха теплицы воздухом извне. Вентиляция осуществляется через фрамуги, расположенные на кровле у конька крыши, или при помощи осевых вентиляторов. При естественной вентиляции фрамуги открывают с обеих сторон конька крыши или только с одной подветренной стороны при большом ветре. Степень открытия фрамуг может иметь несколько промежуточных положений. Принудительная вентиляция при помощи вентиляторов должна иметь возможность регулировать подачу воздуха путем изменения частоты вращения электродвигателя в зависимости от температуры воздуха.

Функционально-технологическая схема управления естественной вентиляцией показана на рис. 7.2, б. Вентиляция осуществляется путем открывания фрамуг исполнительным механизмом 5. Степень открывания фрамуг может составлять 40, 60, 80 и 100 % от полного. Первичный преобразователь 3 контролирует направление и скорость ветра, которые учитываются при выборе степени открытия фрамуг. Реле времени 9 изменяет программу регулирования температуры в дневное и в ночное время. Контроль степени открытия фрамуг осуществляется преобразователем 2 дистанционного указателя положения фрамуг 6. Регулятор 8 совместно с исполнительным механизмом формирует ПИ-закон регулирования. Первичный преобразователь, регулятор и исполнительный механизм того же типа, что и в системе регулирования отопления. Система автоматического регулирования обеспечивает поддержание температуры с отклонением не более 1 % от заданной.

В системе регулирования температуры почвы преобразователь температуры устанавливается на трубопроводе подачи горячей воды, а регулирующее воздействие от двухпозиционного регулятора передается на смесительный клапан. Температура почвы поддерживается в пределах ± 3 °С от заданного значения в диапазоне от 5 °С до 30 °С.

7.2. Автоматическое поддержание влажности почвы

К наиболее распространенным способам полива относятся поверхностный (по бороздам или затоплением), дождевание и подпочвенное орошение. Выбор способа полива зависит от конкретных условий. Наиболее труднодоступным для автоматизации является поверхностный полив. Автоматизация полива

в сочетании с механизацией преследует цель повысить производительность труда и улучшить его качество.

Не вся вода, накапливаемая в почве, может быть использована растениями. Когда сила, с которой корни втягивают воду, становится равной силе связи воды почвой, снабжение растений водой затрудняется. Растения в этом случае начинают подавать признаки устойчивого увядания. Очевидно, такого иссушения почвы допускать нельзя. Излишнее же количество воды вызывает не только ее перерасход, но и нарушает воздушный режим почвы. Следовательно, количество влаги в почве должно находиться в определенных пределах.

На рис. 7.3 показано устройство для регулирования влажности почвы при подпочвенном орошении.

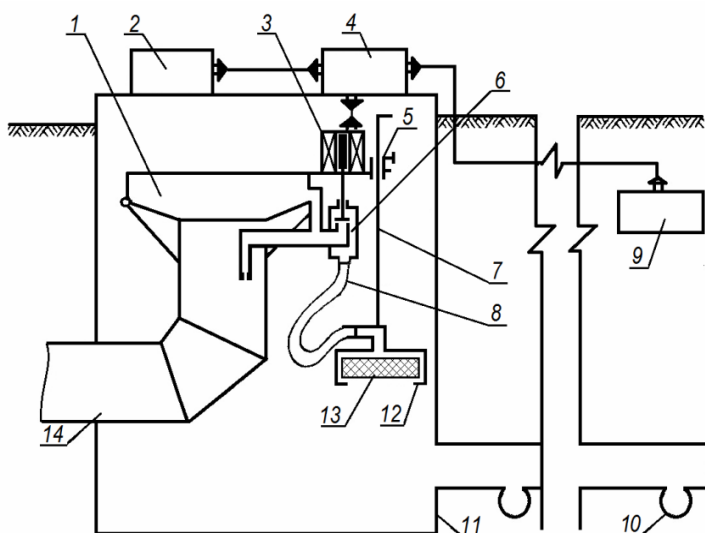


Рис. 7.3. Схема устройства автоматического регулирования влажности почвы

При заданных влажности почвы и уровне воды в колодце 11 поплавковым клапаном 13 закрыт шланг 8 и впускной патрубок 14 перекрыт мембранным запорным органом 5, надмембранная полость которого заполнена водой. При этом электромагнитным клапаном 3 тоже закрыт слив воды из надмембранной полости в камеру регулирования 6.

При снижении уровня воды в колодце *11* поплавковый клапан *13* открывается, однако запорный орган *1* остается закрытым, так как сигнал об уменьшении влажности не поступал, электромагнитный клапан *3* закрыт и вода из надмембранной полости запорного органа *1* не сливается. При уменьшении влажности сигналом с датчика *9* через усилитель *4* открывается электромагнитный клапан *3*. В результате происходит слив воды из надмембранной полости запорного органа *1* через камеру регулирования *6*, гибкий шланг *8* и открытый поплавковый клапан *13* в колодец *11*. При этом запорный орган поднимается под действием напора воды в патрубке *14*. Вода из впускного патрубка попадает в приёмный колодец *11* и дрены-увлажнители *10*.

При повышении уровня воды в колодце *11* возрастает пьезометрический напор в дренах-увлажнителях *10*, что приводит к повышению уровня грунтовых вод. Благодаря наличию поплавковой камеры *12* с поплавковым клапаном *13*, которая гидравлически связана с электромагнитным клапаном *3* и запорным органом и представляет собой регулятор напора, ограничивается пьезометрический напор в дренах-увлажнителях посредством поддержания заданного уровня в колодце *11* и зависящий от него уровень грунтовых вод. Уровень в колодце задается перемещением по вертикали поплавковой камеры *12*, закрепленной на стержне *7*, и фиксацией последнего стопорным винтом *5*. При достижении грунтовыми водами заданного уровня он будет поддерживаться, пока влажность почвы не достигнет заданной за счет капиллярного подпитывания. Тогда с датчика *9* поступает сигнал, и подача воды прекращается. Независимо от уровня воды в приемном колодце *11* патрубок *14* будет закрыт, пока влажность снова не снизится. Благодаря наличию дождемера *2* устройство реагирует на осадки и прекращает подачу воды при их выпадении в достаточном количестве.

Применение устройства позволяет обеспечить высокую точность регулирования и поддерживать правильный баланс влажности в почве.

Применяемые в практике полива современные системы автоматизации относятся к системам программного управления. Они базируются на современной технологии полива, в основе которой лежат эмпирические методы. Такие методы используют наряду

с данными биологической науки о роли воды в жизни растений орошаемого земледелия и результаты производственных экспериментов по орошению определенной культуры в конкретных условиях. Все это в совокупности позволяет устанавливать поливной режим, который складывается из числа и сроков поливов, значений оросительных и поливных норм. Заданный поливной режим является исходной программой автоматизации, которая, помимо повышения производительности труда, должна обеспечивать в определенные сроки заданные поливные и оросительные нормы.

На рис. 7.4 показана структурная схема при надпочвенном поддержании заданной влажности в теплице.

Автоматизированная система управления влажностными параметрами представляет собой комплекс автоматизированного контроля и управления влажностным режимом теплицы и является программно-технической системой для достоверного измерения состояния климата в теплице и расчета на этой основе управляющих воздействий на исполнительные механизмы инженерного оборудования теплицы.

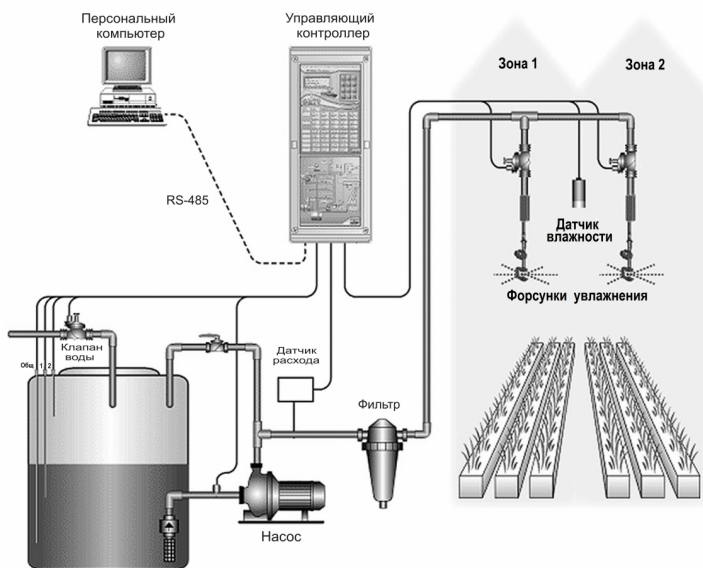


Рис. 7.4. Структурная схема САУ влажностными параметрами теплицы

Система выполняет следующие функции:

- задание суточного цикла влажности и поддержание необходимого климатического режима;
- контроль расхода воды в канале распыления;
- представление технологической информации в удобном для оперативного персонала виде;
- повышение производительности теплицы за счет жесткого автоматического поддержания требуемых параметров.

Архитектура данной системы имеет два уровня: нижний – подсистема управления (датчики, микроконтроллер, исполнительные механизмы и оборудование) и верхний – пост оператора (персональный компьютер). Связь между уровнями осуществляется по интерфейсу RS-485. Реализация алгоритмов управления осуществляется с помощью автоматизированного модуля верхнего уровня (например, SCADA-система TRACE MODE), который также отвечает за интерфейс на посту оператора.

Вопросы для самоконтроля

1. Какими параметрами в сооружении защищенного грунта управляет автоматическая система?
2. Как и когда осуществляется вентиляция сооружений защищенного грунта?
3. Какую функцию выполняет поплавковый клапан в устройстве автоматического регулирования влажности почвы?
4. Какое устройство при автоматическом регулировании влажности почвы контролирует наличие внешних осадков?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Средства автоматики сельскохозяйственной техники : учебно-методический комплекс / сост.: В. В. Маркевич, В. В. Носко. – Минск : БГАТУ, 2014. – 164 с.
2. Средства автоматики и автоматизация технологических операций : лабораторный практикум / В. В. Носко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2018. – 189 с.
3. Захахатнов, В. Г. Технические средства автоматизации : учебное пособие / В. Г. Захахатнов, В. М. Попов, В. А. Афонькина. – СПб.: Лань, 2020. – 144 с.
4. Рачков, М. Ю. Технические средства автоматизации : учебник для академического бакалавриата / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 180 с.
5. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления : учебник для прикладного бакалавриата / И. Ф. Бородин, С. А. Андреев. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 386 с.
6. Фурсенко, С. Н. Автоматизация технологических процессов : учеб. пособие / С. Н. Фурсенко, Е. С. Якубовская, Е. С. Волкова. – Минск : БГАТУ, 2007. – 592 с.
7. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, А. А. Рысс. – М. : Колос, 2006.

Учебное издание

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Пособие

Составители:

Ловкис Виктор Болеславович,
Маркевич Владимир Владимирович,
Носко Вячеслав Владимирович и др.

Ответственный за выпуск *Т. А. Непарко*
Редактор *Г. В. Анисимова*
Корректор *Г. В. Анисимова*
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 28.03.2024. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 9,53. Уч.-изд. л. 7,45. Тираж 99 экз. Заказ 71.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.