

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА**

Акматбеков Р. А.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ



**Допущено Министерством образования и науки
Кыргызской Республики в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений**

БИШКЕК 2013

Рекомендовано к печати решением Ученого Совета
КГТУ им. И. Раззакова

Протокол №4, от 26.12.2012 г.

УДК 681.5.01

Рецензенты:

1. Директор Института автоматизации и информационных технологий НАН КР,
д.т.н., проф., академик НАН КР Шаршеналиев Ж. Ш.
2. Зав. кафедрой компьютерных информационных систем и управления МУК, д.т.н., проф., Миркин Е. Л.
3. Зав. отделом по реализации проекта КГТУ-БГТУ,
д.т.н., проф. Кадыров И. Ш.

Акматбеков Р. А.

Системы автоматизации и управления. Учебник для студентов высших учебных заведений направлений «Автоматизация и управление», «Информатика и вычислительная техника», «Телекоммуникация» / КГТУ им. И. Раззакова. – Б.: ИЦ «Текник», 2013. - 225 с.

В учебнике рассмотрены следующие вопросы:

- организация и виды обеспечений САУ;
- обработка информации и принятие решений в непрерывных САУ;
- обработка информации и принятие решений в цифровых САУ;
- программно-технические комплексы САУ;
- техническое обеспечение САУ.

Предназначено для студентов направлений «Автоматизация и управление», «Информатика и вычислительная техника», «Телекоммуникация», а также для аспирантов и инженеров, изучающих системы комплексной автоматизации в технических системах.

Табл: 28. Ил: 102. Библиог: назв. 76

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
1. Организация и типовое обеспечение САУ	8
1.1 Классы систем автоматизации и управления	8
1.2 Задачи разработки систем автоматизации и управления	15
1.3 Промышленные системы автоматизации и управления	23
1.3.1. Локальные САУ	23
1.3.2. Централизованные САУ	31
1.3.3. САУ технологическими процессами	34
1.4 Организация и классификация компьютерных систем автоматизации и управления	37
1.4.1. Организация компьютерных САУ	37
1.4.2. Декомпозиция САУ	43
1.4.3. Классификация компьютерных САУ	45
1.5 Виды обеспечений компьютерных САУ	50
1.6 Методы проектирования САУ	54
1.6.1. Иерархическая структура управления	54
1.6.2. Детерминированные системы	56
1.6.3. Проектирование систем автоматизации и управления ...	61
2 Обработка информации и принятия решений в непрерывных САУ	67
2.1 Математические модели сигналов и процессов	67
2.2 Первичная обработка измерительной информации	70
2.3 Алгоритмы принятия решений	74
2.4 Параметрический синтез систем управления	77
2.4.1 Параметрическая оптимизация детерминированных систем управления при детерминированных воздействиях ...	77
2.4.2 Параметрическая оптимизация детерминированных систем управления при случайных воздействиях	79
2.5 Системы высокого качества	83
2.6 Параметрический синтез в частотной области	89
2.7 Табличная настройка алгоритмов управления	94
2.7.1 Выбор закона управления	95
2.7.2 Табличная настройки алгоритмов управления	97
3 Обработки информации и принятие решений в цифровых САУ	103
3.1 Цифровые системы автоматизации и управления	103
3.2. Эквивалентная структурная схема ЦСАУ	108

3.2.1 Дельта - импульсный модулятор	109
3.2.2. Преобразование последовательностей дельта-импульсов	111
3.2.3 Расчетная схема цифровых систем	113
3.3 Стандартные дискретные алгоритмы управления	116
3.3.1. Способы дискретизации непрерывных моделей	117
3.3.2. Дискретное представление ПИД – алгоритмов	119
3.3.3. Модификация дискретных алгоритмов управления	120
3.4 Параметрические оптимизируемые алгоритмы	122
3.5 Параметрическая оптимизация цифровых САУ	128
4 Программно-технические комплексы САУ	132
4.1 САУ с управляющими ЭВМ	132
4.1.1 Аппаратурная организация ПЛК	133
4.1.2 Система программирования ПЛК	137
4.2 Программное обеспечение ПТК САУ	137
4.2.1 Сетевые операционные системы	138
4.2.2 Семейство операционных систем UNIX	142
4.2.3 Системные продукты Microsoft	143
4.2.4 Языки программирования ПЛК	145
4.3 Цифровая САУ двигателем постоянного тока	151
4.4 САУ трансформаторными подстанциями	153
4.5 САУ очистной установки	168
5 Техническое обеспечение САУ	169
5.1 Классификация технических средств САУ	169
5.2 Агрегатные комплексы технических средств	172
5.3 Устройства получения информации	178
5.4 Емкостные и индуктивные датчики	191
5.5 Устройства преобразования информации	197
5.5.1 Цифро-аналоговый преобразователь	198
5.5.2. Аналого-цифровой преобразователь	204
5.6 Устройства использования командной информации	208
Литература	221

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина "Системы автоматизации и управления" была введена для специальности 550201.01 – "Управление и информатика в технических системах" сравнительно недавно – с середины 90-х годов 20-го столетия. Ранее вместо этой дисциплины читались такие курсы, как "Локальные системы автоматики", "Автоматизированные системы управления технологическими процессами". Системы автоматизации и управления (САУ), известные в литературе также как комплексные системы автоматизации [1-15], являются актуальными для изучения в рамках вузовской программы. САУ объединяют различные частные системы (системы управления, системы контроля и т. д.) и строятся с использованием всего объема интегрированных знаний студента за все годы обучения.

Учебника по данной дисциплине нет в Кыргызской республике, ее не было и в бывшем Советском союзе. Лекционный материал приходится отбирать из многочисленных учебных и научных изданий.

Автор в течение ряда лет читает данный курс для студентов специальности 550201.01 – "Управление и информатика в технических" Кыргызского государственного технического университета (КГТУ) им. И. Раззакова. Лекционный курс и лег в основу предлагаемого учебника, который может быть использован также студентами смежных специальностей факультета информационных технологий КГТУ и студентами родственных специальностей других вузов. Учебник может оказаться полезным аспирантам и инженерам.

В учебнике рассматриваются следующие вопросы:

- организация и виды обеспечений САУ;
- обработка информации и принятие решений в непрерывных САУ;
- обработка информации и принятие решений в цифровых САУ;
- программно-технические комплексы САУ;
- техническое обеспечение САУ.

Автор заранее благодарит читателей за возможные замечания и предложения по содержанию и оформлению издания.

Автор выражает благодарность ведущему специалисту Кыргызско-корейского центра информационного доступа КГТУ им. И. Раззакова Жаманкуловой Римме Калдаровне, которая оказала большую помощь при подготовке рукописи к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизацию производственных процессов отраслей экономической деятельности людей рассматривают как одно из определяющих направлений научно-технического прогресса, которое позволяет поднять качество продукции, эффективность производства и использовать современные достижения науки и техники в производстве.

Системы автоматизации и управления (САУ) решают задачи контроля и сигнализации, регулирования и управления [1-15]. Наблюдается явно выраженная тенденция перехода от аналоговых САУ к цифровым, в которых в качестве центральной части используются управляющие микроЭВМ и контроллеры. Цифровые САУ обеспечивают ряд новых качеств, в числе которых повышенная помехоустойчивость, многоканальность, программируемость, лучшее быстродействие и точность.

В мировой практике разработаны и внедрены различные системы автоматизации и управления в промышленной и непромышленной сферах. Продолжается создание гибких автоматизированных производств (ГАП), робототехнических систем, автоматических и автоматизированных систем управления техническими и технологическими процессами на основе новейшей микроэлементной базы.

Существуют несколько десятков компаний – производителей микроконтроллеров, управляющих микроЭВМ, средств коммуникаций и периферийных устройств САУ, а также программного обеспечения, продукции которых распространяются по всему миру [16-30]. Таким образом, в создании современных САУ широко используются средства автоматизации, вычислительной техники и телекоммуникаций.

Предпосылкой успешной разработки и внедрения систем автоматизации не только отдельных операций и установок, но и технологических процессов, цехов и в целом предприятий, являются достижения ряда научных дисциплин – составных частей технической кибернетики [8]: автоматического управления; адаптивного и оптимального управления; теории информации; системного анализа; теории принятия решений; теории идентификации; статистических методов; методов оптимизаций и т. д.

Широкое применение информационных технологий повышает привлекательность современных САУ.

К важным технико-экономическим показателям САУ относятся:

- качество процессов управления;
- возможность адаптации САУ к изменяющимся свойствам объекта и окружающей среды;
- надежность и живучесть;
- ремонтпригодность;
- условия работы оператора;
- безопасность эксплуатации;
- затраты на проектирование и эксплуатацию.

Целью изучения дисциплины является формирование у студентов технических специальностей знаний о назначении, разновидностях, организационных структурах, алгоритмическом и программном обеспечении непрерывных и цифровых САУ, а также о их технической реализации на базе современных микропроцессорных средств.

В задачи изучения дисциплины входят:

1. Современное состояние автоматизации отраслей экономической деятельности, роль и место САУ в организации экономической деятельности.

2. Классы и типы САУ. Организация и функциональная структура САУ различного назначения, виды обеспечений САУ.

3. Сбор, первичная обработки измерительной информации и принятие решения (выработка командного воздействия) в непрерывных САУ. Критерии оценки и инженерные методы расчета непрерывных систем управления с типовыми промышленными регуляторами.

4. Цифровые САУ, эквивалентная структура цифровых систем. Задачи модернизации, моделирования и проектирования систем управления. Цифровые алгоритмы управления, получаемые путем дискретизации непрерывных моделей. Цифровые алгоритмы управления низких порядков. Инженерные методы расчета цифровых систем с типовыми регуляторами.

5. Технические средства (ТС) САУ. Основные характеристики функциональных элементов САУ. Классификация ТС по роду используемой энергии и назначению. Функциональные устройства электрической ветви ТС. Назначение, принципы построения и программное обеспечение программно-технических комплексов (ПТК).

1. ОРГАНИЗАЦИЯ И ТИПОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

1.1 Классы систем автоматизации и управления

Системы автоматизации и управления (САУ) представляют собой более широкий класс систем, чем системы автоматического управления. САУ (рис. 1.1) включают в себя как подсистемы:

1. Системы автоматического управления, которые решают задачу управления объектами без участия человека-оператора.

2. Системы автоматического контроля, которые решают задачу автоматического контроля параметров объекта путем измерения и отображения их в виде числовой информации.

3. Системы отображения информации, которые решают задачу автоматизации представления оператору нечисловой информации о состоянии САУ и ее отдельных фрагментов. Эта подсистема известна также как система сигнализации.

4. Системы аварийного управления, которые решают задачу автоматизации управления в предаварийных и аварийных режимах работы объекта путем принятия особых мер по устранению аварии или безопасному отключению объекта с минимальным последующим ущербом.

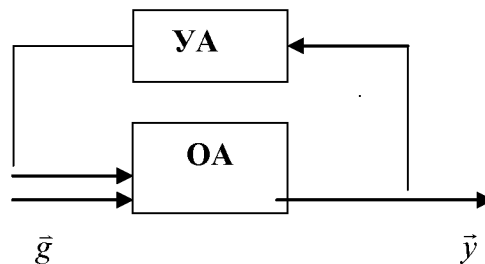


Рисунок 1.1. Система автоматизации и управления: ОА – объект автоматизации, УА – устройства автоматизации, $\vec{g}(t)$ – задание (цель автоматизации), $\vec{y}(t)$ – выходные (контролируемые и управляемые) величины.

Современные САУ представляют собой программно-технические комплексы (ПТК), так как в качестве центральной части таких систем служат управляющие вычислительные машины (УВМ), разновидности которых в настоящее время называют как промышленные компьютеры, программируемые логические контроллеры (ПЛК) и управляющие микроЭВМ. Большинство таких САУ относятся к так называемым

мым сложным (большим) системам.

Функционирование САУ поддерживается различными видами обеспечения, к которым относятся:

- техническое обеспечение;
- алгоритмическое обеспечение;
- программное обеспечение;
- лингвистическое обеспечение;
- эргономическое обеспечение;
- организационное обеспечение;
- информационное обеспечение;
- методическое обеспечение.

САУ можно классифицировать по различным признакам. Ими могут служить степень автоматизации функций управления, степень сложности, степень определенности, используемый принцип управления, характер протекания процессов, функциональная структура, область применения (назначение) и т.д. Классификация по некоторым признакам изучается в рамках теории автоматического управления.

По **степени автоматизации функций управления** различают системы ручного управления, системы автоматизированного управления и системы автоматического управления:

1. В системах **ручного управления** оператор определяет состояние объекта автоматизации (ОА), прочитав показания контрольно-измерительных приборов и приборов сигнализации, и приводит в действие рабочий орган, т. е. выполняет функцию устройства управления.

2. В системах **автоматического управления** устройство управления все свои функции выполняет самостоятельно в автоматическом режиме, т. е. без участия человека.

3. **Системы автоматизированного управления** работают с частичным участием человека-оператора. В цепи управления появляются два управляющих элемента: устройство управления и оператор или ЛПР - лицо, принимающее решение. Функции ЛПР может выполнять инженер, технолог, начальник цеха, главный инженер или руководитель предприятия и т.д. В такой системе, в зависимости от режима работы, функции управления выполняет либо устройство управления, либо ЛПР и устройство управления.

По **степени сложности** САУ делят на простые и сложные. Строгого определения, позволяющего четко разделить эти системы, не су-

существует. Понятие **сложной** системы возникло как отражение факта существования в реальном мире таких объектов, достаточно полное (математическое) описание которых либо затруднительно, либо совсем невозможно.

Математическую модель объекта управления (ОУ) записывают в терминах "вход-выход", либо в пространстве состояний. Модели типа "вход-выход" могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций, частотных функций или временных характеристик.

Математическую модель класса "вход-выход" в обобщенной форме записывают с помощью математического оператора F_1 в виде:

$$\vec{y}(t) = F_1[\vec{u}(t), \vec{z}(t), \vec{f}(t), \vec{a}(t)], \quad (1.1.1)$$

где $\vec{u}(t)$ - вектор управляющих переменных; $\vec{z}(t)$ - вектор контролируемых, но неуправляемых переменных; $\vec{f}(t)$ - вектор неконтролируемых, неуправляемых возмущений; $\vec{y}(t)$ - вектор выходных (управляемых) переменных; $\vec{a}(t)$ - вектор параметров модели.

Математическая модель в пространстве состояний записывается как

$$\vec{x}^{(1)}(t) = F_2[\vec{u}(t), \vec{x}(t), \vec{z}(t), \vec{f}(t), \vec{a}(t)], \quad (1.1.2)$$

где $\vec{x}(t)$ - вектор состояния, $\vec{x}^{(1)}(t)$ - первая производная от вектора состояния.

Зависимость между управляющей величиной, вырабатываемой устройством управления и подаваемой на вход ОУ, и векторами $\vec{x}(t)$, $\vec{z}(t)$, $\vec{f}(t)$ называется алгоритмом управления:

$$\vec{u}(t) = U\{\vec{x}(t), \vec{z}(t), \vec{f}(t)\}. \quad (1.1.3)$$

Таким образом, алгоритм управления или закон управления определяет правило работы устройства управления.

Пусть работа САУ характеризуется некоторым показателем качества J , который обычно называют критерием управления или целевой функцией:

$$J = J\{\vec{u}(t), \vec{z}(t), \vec{f}(t), \vec{x}(t)\}, \quad u(t) \in A(t); \vec{x}(t) \in B(t). \quad (1.1.4)$$

Ограничения в (1.1.4) показывают, что в реальных системах изменения вектора управления и состояния могут происходить в пределах некоторой конечной области. Задача синтеза системы управления со-

стоит в отыскании такого управляющего воздействия $\vec{u}^*(t)$ (1.1.3), которое обеспечивает целевой функции наилучшее приближение к заданному (оптимальному) значению целевой функции J^* :

$$J\{\vec{u}^*(t), \vec{x}(t), \vec{z}(t), \vec{f}(t)\} = J^*.$$

Из (1.1.3) следует, что $\vec{u}^*(t)$ есть, в частности, функция состояния объекта, поэтому каждому состоянию ОУ должно соответствовать определенное состояние управляющего органа. Следовательно, управляющий орган должен обладать не меньшим числом возможных состояний, чем объект управления. Таким образом, управляющий орган для эффективного управления должен быть такой же степени сложности, как и объект управления. Совокупность сложного устройства управления и сложного ОУ называют сложной системой управления.

Сложные САУ имеют следующие характерные особенности [1]:

1. Число параметров, которыми описывается сложная система, весьма велико. Некоторые из этих параметров не поддаются количественному описанию и измерению.

2. Цели управления, которые являются функциями времени, не поддаются формальному описанию без существенных упрощений.

3. Трудно или даже невозможно дать строгое формальное описание сложной САУ. Как правило, основной задачей при моделировании таких систем является поиск разумного упрощения их описания. Для представления сложных ОУ необходимо использовать различные модели (языки): словесные (вербальные), математические, схемы, графики, таблицы и т.д.

Модель сложного ОУ часто получают путем декомпозиции, когда объект делится на ряд более простых, относительно самостоятельных, но взаимосвязанных между собой составных частей. Каждая часть ОУ имеет самостоятельную цель функционирования. Достижение целей всех составных частей приводит к выполнению общей цели функционирования ОУ. САУ создаются для каждой части ОУ в виде подсистем, которые образуют иерархическую структуру. Таким образом, декомпозиция ОУ приводит и к декомпозиции САУ. В процессе управления собственные (локальные) цели подсистем нужно согласовывать с общей (глобальной) целью системы, что, как правило, является сложной задачей координации в иерархической САУ. Сложные системы в некоторых случаях также называют большими системами.

Простым называется ОУ, который не является сложным. Однако такое формальное определение станет более понятным, если указать ряд дополнительных признаков.

1. Простые ОУ имеют ограниченное количество контролируемых и управляемых переменных, чаще всего, одну входную и одну выходную переменные. ОУ может иметь несколько входных и выходных переменных, если является линеаризуемым и несвязным.

2. ОУ имеет хорошо известное, апробированное и работоспособное математическое описание.

3. Объект имеет стационарные или квазистационарные условия работы.

4. ОУ имеет компактное расположение.

В отличие от сложной САУ при автоматизации простых объектов возникают простые САУ. Большинство локальных (местных) САУ являются простыми.

Примером простого ОУ может быть электрический двигатель, который служит в качестве привода (источника движения) в различных объектах. Типичными задачами по отношению к электрическому двигателю являются задачи управления угловой скоростью и углом поворота вала двигателя. Особые типы электрических машин используются при создании следящих систем, контрольно-измерительных систем, систем преобразования информации.

По **степени определенности** САУ делятся на детерминированные и стохастические (вероятностные).

По **функциональной структуре** САУ с цифровым устройством обработки информации можно разделить на три класса:

- централизованные;
- супервизорные;
- децентрализованные.

К числу объектов автоматизации относятся самые разнообразные процессы и устройства технической природы и различные процессы и системы нетехнической природы. Объектами автоматизации могут быть:

- технические устройства и технологические установки промышленного производства;
- транспортные системы;
- системы подготовки производства;
- системы промышленных испытаний;
- научные исследования;

- складское хозяйство;
- гибкие производственные системы;
- системы проектирования;
- экономические службы промышленного предприятия;
- система подготовки и переподготовки кадров.

Многие из перечисленных объектов встречаются на промышленных предприятиях, заводах и фабриках.

В дальнейшем основное внимание уделяется объектам **технического характера**.

По **области применения или по назначению** можно различать следующие системы:

- САУ для технических и технологических объектов, к которым можно отнести САУ ТП, САУ для объектов энергетики, транспорта и т. д.;
- САУ для научных и промышленных исследований: автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), автоматизированные системы промышленных испытаний (АСПИ);
- САУ для проектных работ – САПР;
- САУ для производств, характеристики которых может изменяться в широких пределах – гибких (перенастраиваемых) предприятий;
- САУ для производств, где работа человека является либо затруднительной, либо малопродуктивной, либо сопряжено с опасностью для жизни – робототехнические системы (РТС);
- САУ для автоматизации экономических задач – САУ для финансов, бухгалтерии, материально-технического снабжения и т. д.;
- САУ для организационных задач – САУ для предприятия, для кадров, для подразделения учреждения (предприятия).

Многие САУ производственными процессами можно отнести к сложным (большим) САУ. На рис. 1.2 рассмотрено иерархическое построение системы автоматизации и управления предприятием.

Первый (нижний) уровень составляют САУ отдельными технологическими операциями, агрегатами и установками. Это уровень локальных САУ, где решаются задачи автоматизации отдельных элементов промышленного предприятия.

Второй уровень – это САУ производственными участками и технологическими линиями, на котором решается задача автоматизации взаимосвязанных групп процессов и установок.

На третьем уровне решаются задачи автоматизации производственных цехов. С этого уровня система автоматизации перестает быть чисто технической, т. к. с этого уровня решаются также задачи технико-экономического характера. К ним относятся разработка сменных, суточных, месячных графиков работы, расчет и прогнозирование технико-экономических показателей, учет готовой продукции, поступления сырья, полуфабрикатов и комплектующих и т. п.



Рисунок 1.2. САУ промышленным предприятием.

Четвертый уровень - САУ предприятием, где решаются более крупные и более медленные задачи, по сравнению с уровнем автоматизации производственных процессов. Эти задачи посвящены планированию производства и сбыта продукции, транспортировке и складированию исходных фрагментов производства и готовой продукции, технологической подготовке производства и организации промышленных испытаний, проектированию новых изделий и опытно-конструкторским работам (ОКР), экономическому анализу и подготовке кадров.

Совокупность САУ первого и второго уровней называют САУ технологическими (техническими) процессами (САУ ТП).

1.2 Задачи разработки систем автоматизации и управления

Процесс создания САУ техническими процессами (ТП) требует сравнительно крупных затрат, длительных сроков, значительных усилий специалистов различного профиля, участия многих организаций, предприятий [1-5, 9-15]. В основном САУ ТП – это большие (сложные) системы.

Обобщая характерные свойства САУ можно выделить следующие их особенности:

1. Физическая разнородность устройств и элементов, входящих в САУ (гетерогенность).

2. Непрерывный динамический процесс функционирования.

3. Многокритериальность условий применения и работоспособности, при которой проявляется присущая многокритериальным задачам противоречивость критериев.

4. Неопределенность параметров системы и возмущающих воздействий, обусловленная внешними и внутренними шумами, нестационарностью параметров устройств САУ.

5. Создание и эксплуатация САУ на базе микропроцессоров или управляющих ЭВМ.

6. Наличие нескольких контуров управления и многомерность.

Задача создания большой системы требует для своего технико-экономического решения определенной проектирующей системы, которая, в свою очередь, также является системой большого масштаба.

Основные свойства САУ ТП диктуют требования к проектированию и производству САУ как специфического класса технических систем.

Разработка и создание САУ ТП содержит [1-5] следующие стадии:

1. Технико-экономическое обоснование (ТЭО).

2. Техническое задание (ТЗ).

3. Технический проект (ТП).

4. Рабочий проект (РП).

5. Внедрение

6. Эксплуатация.

Рассмотрим основное содержание отдельных стадий.

1. Цель стадии ТЭО состоит в формировании обоснованного с позиции пользователя (заказчика) системы предложений о создании САУ ТП с основными функциями и техническими характеристиками. На этой стадии проводится технико-экономическое обследование

объекта для выявления достигнутой на объекте степени использования производственных ресурсов (труда, сырья, материалов, топлива, энергии и оборудования), влияния автоматизации управления на вскрытие резервов, сокращение расходов ресурсов. При этом исходными материалами служат:

- первичные эксплуатационные документы, дающие представление о конструктивном исполнении и режимах функционирования объекта управления (ОУ);
- инструкции и регламенты, на основе которых реализуется и управляется ТП;
- сведения о системе оплаты труда, материального и морального поощрения обслуживающего ОУ персонала;
- результаты подобных работ, проведенных в стране и за рубежом.

По результатам технико-экономического обследования формулируются исходные технические требования к создаваемой САУ ТП.

2. Стадия ТЗ обеспечивает достижение целей:

- подтверждение целесообразности и детального обоснования возможности создания эффективной САУ ТП;
- планирование совокупности всех научно-исследовательских, опытно-конструкторских, проектных, монтажно-наладочных работ и сроков их выполнения;
- подготовка всех материалов для проведения проектных работ.

На стадии ТЗ проводится детальное обследование ОУ, анализ технического процесса как объекта управления, определение математических моделей управляемых объектов и их оптимизация, формулировка функциональных задач. Проводится предварительная оценка возможности реализации этих задач с помощью современных средств автоматизации и вычислительной техники. Кроме того, на этом этапе осуществляется предварительный выбор технического и математического обеспечения, требования к САУ ТП и его технико-экономическим показателям.

3. На стадии технического проекта разрабатываются технические решения по созданию САУ ТП и определение сметной стоимости создаваемой системы. На этой стадии определяются и анализируются функциональные и структурные схемы САУ ТП, определяются требования к помещениям, необходимым видам энергии, средствам автоматизации, производственной связи и т. д. На основе сформированных требований определяется перечень серийно выпускаемых

средств автоматизации и нестандартного оборудования, подлежащего разработке.

4. На стадии РП проводится выпуск рабочей документации на создаваемую систему. Рабочая документация состоит из проектно-сметной документации, необходимой и достаточной для приобретения, монтажа и наладки комплекса технических средств, и документации программного и организационного обеспечения.

Таким образом, создание САУ ТП предполагают выполнение следующих действий:

- научно-исследовательские работы;
- проектирование;
- экспертиза и утверждение проекта;
- разработка нестандартного оборудования;
- комплектация оборудования, материалов, покупных изделий;
- монтаж;
- наладка;
- эксплуатация.

Заказчик, которым может быть промышленное предприятие, исследовательская организация или образовательное учреждение формирует и выдает заказ на САУ. Такой заказ содержит идею, исходные данные и обоснование будущего объекта. Получение этого заказа проектной организацией означает начало процесса проектирования.

Проектирование представляет собой процесс создания технической документации, опытных образцов и моделей САУ, необходимых и достаточных для ее изготовления на промышленных предприятиях. Проектирование должно учитывать современное состояние технических средств, видов обеспечений и закладывать в проект структуры и параметры САУ, обеспечивающие требования **заказчика**.

Усилиями проектировщиков разрабатываются принципиальные схемы, чертежи, конструкции, технологические маршруты и множество другой технической документации. Документы проекта должны также содержать задания проектировщикам смежных профессий, а при необходимости – задания на выполнение ОКР и НИР. В проектирование входит также разработка прикладных программ для промышленных (управляющих) компьютеров и их отладка.

Проект поступает в специальное конструкторское и технологическое бюро (СКБ) завода. В СКБ осуществляется технологическая подготовка производства. Суть подготовки состоит в том, чтобы в со-

ответствии с проектом, а также в соответствии с производственной практикой, составом станков, оснастки и приспособлений конкретного завода разработать технологические маршруты и карты последовательности рабочих операций изготовления деталей, их сборки, контроля и сдачи заказчику.

На завод **поступает проектная и технологическая документация**, которая должна одновременно определить все необходимые для изготовления готового изделия рабочие операции, производимые оборудованием завода (станками, транспортом, приспособлениями, оснасткой) над заготовками, комплектующими изделиями и материалами, поступающими на завод вместе с указанной документацией.

Изготовленное на заводе изделие подвергается многочисленным испытаниям, по результатам которых могут корректироваться работы предыдущих этапов. После приемки изделия заказчиком начинается серийное изготовление и эксплуатация системы в соответствии с его назначением.

Рассмотрим основные определения из области проектирования.

Проектная процедура- совокупность проектных операций над исходными данными, выполнение которых заканчивается проектным решением.

Проектная операция – действие или совокупность действий проектировщика, составляющих часть проектной процедуры и заканчивающихся получением фрагмента проектного решения.

Проектное решение - промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для завершения проектной процедуры.

Проект – совокупность проектных документов (технической документации) в соответствии с установленными стандартами перечнем, к примеру, Единой системой конструкторской, технологической и программной документации (ЕСКД, ЕСТД и ЕСПД) и опытный образец, в которых представлен результат проектирования.

Средства проектирования – это инструменты проектировщика: карандаш, бумага, макеты, чертежные столы, ЭВМ и внедряемые в настоящее время средства САУ и т. д..

В отличие от других объектов машиностроения и приборостроения, являющихся обычно отдельными устройствами, САУ представляет собой систему из устройств, работающих в режиме управления заданным объектом. При этом большой вес приобретают такие проектные процедуры, как анализ устойчивости, качества и точности

САУ, синтез регуляторов, в том числе на цифровом базисе, построение математических моделей объекта и устройства управления, математическое моделирование системы, сборка и стыковка отдельных конструктивных узлов.

При проектировании существенное значение приобретает физическая разнородность (гетерогенность) устройств САУ. В устройствах САУ используются практически все известные и пригодные для технического применения физические явления. Это обстоятельство придает процессу проектирования САУ определенные особенности. Заказы на устройства САУ приходится размещать не на одном, а на нескольких проектных предприятиях по специализации. В любом случае в создании САУ ТП участвуют многие организации: генеральный проектировщик предприятия, проектировщик САУ ТП, разработчик или изготовитель технических средств, органы снабжения, монтажная организация, автоматизируемое предприятие и т. д. Все эти организации в процессе создания САУ ТП образуют систему создания САУ. Поскольку каждая из этих организаций является системой большого масштаба, то и их сочетание также является большой системой.

При разработке принципиальной схемы САУ приходится учитывать реальные характеристики и физическую природу ее элементов, источники их энергии и сигналов, место включения управляющих воздействий. При разработке конструкции и технологии изготовления существенное значение приобретают операции сборки и согласования разнообразных конструкторских и технологических форм отдельных устройств. Важное значение приобретает проектирование в составе САУ управляющих ЭВМ (УВМ) и микропроцессоров.

Проектирование УВМ и микропроцессоров связано с разработкой **как аппаратуры, так и алгоритмических и программных средств**, что значительно расширяет круг вопросов, решаемых проектировщиками по сравнению с недавним прошлым.

САПР - это инструментарий проектировщика, включающий в себя техническое, математическое, лингвистическое, программное, информационное, методическое и организационное обеспечения и предназначенный для автоматизации проектирования объектов, в частности – систем автоматизации и управления.

Испытания САУ становятся важнейшим этапом проектирования, так как при разработке принципиальных схем никогда не удастся учесть все специальные конструктивные, технологические и физические свойства отдельных устройств, входящих в САУ.

Под наладкой понимают приведение в рабочее состояние всех технических средств САУ ТП и обеспечение готовности их работы в процессе опробования контрольных испытаний и приемки.

Под внедрением понимают процесс перехода к практическому использованию решений проекта САУ ТП. О внедрении САУ ТП можно говорить лишь тогда, когда технические средства САУ ТП используются для управления производством по новой технологии управления, разработанной в проекте.

Решающими этапами по степени их влияния на качество будущей САУ ТП следует признать проектирование и внедрение. Подробное содержание этих этапов дано [2-5] в табл. 1.1.

В процессе выполнения 1-го этапа проектирования осуществление других работ нецелесообразно, так как это накладывает на проект случайные связи и отклонения его от лучшего варианта. После утверждения проекта предприятие получает средства для финансирования разработки нестандартного оборудования, приобретения серийно выпускаемых технических средств, материалов и т.д. Однако на этом этапе целесообразно только заказать оборудование по заявочным ведомостям, которые подтверждаются заказными спецификациями. Эти документы выдаются проектной организацией на стадии рабочего проектирования. После получения оборудования начинается комплектация САУ ТП.

Монтажные работы начинаются после изготовления нестандартного оборудования или после получения основного оборудования в порядке комплектации.

Наладочные работы начинаются после выполнения определенного объема монтажных работ.

Внедрение САУ ТП следует начинать в процессе рабочего проектирования, не ожидая монтажа и наладки оборудования. В первую очередь ведется подготовка персонала для обслуживания будущей САУ ТП, подготовка помещений, разработка нестандартного оборудования. В реальных условиях рабочее проектирование может длиться

Таблица 1.1

Стадия (фаза)	Этап
1. Техническое задание	1.1. Предварительное обследование автоматизируемого технологического процесса - сбор исходных материалов 1.2. Предпроектные научно-исследовательские работы 1.3. Эскизная разработка САУ ТП

	1.4. Разработка технического задания на создание САУ ТП
2. Технический проект	<p>2.1. Схемотехнический синтез САУ ТП</p> <p>2.2. Аппаратурно-технический синтез САУ ТП</p> <p>2.3. Составление технических заданий на разработку в смежных частях технического проекта объекта автоматизации</p> <p>2.4. Составление технических заданий на разработку новых средств автоматизации</p> <p>2.5. Разработка технических заданий на оперативно-диспетчерское оборудование, не выпускающееся серийно</p> <p>2.6. Разработка сметы на создание САУ ТП</p> <p>2.7. Составление заявочных ведомостей</p> <p>2.8. Расчет ожидаемой технико-экономической эффективности САУ ТП</p> <p>2.9. Составление патентного формуляра САУ ТП</p> <p>2.10 Сравнительный анализ разрабатываемой САУ ТП и ее известных аналогов</p> <p>2.11. Подготовка технического задания на разработку специального математического и информационного обеспечения САУ ТП</p> <p>2.12. Техническое проектирование специального математического и информационного обеспечения САУ ТП</p>
3. Рабочий проект	<p>3.1. Разработка рабочей документации на системы локальной САУ</p> <p>3.2. Составление заказных спецификаций на УВМ, оргтехнику, а также:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) приборы и средства автоматизации; b) электроаппаратуру; c) трубопроводную арматуру; d) щиты и пульты; e) основные монтажные материалы; f) оборудование, не выпускаемое серийно; g) кабели и провода. <p>3.3. Корректировка технических заданий на разработку смежных частей проектов (в случае необходимости)</p> <p>3.4. Разработка рабочей документации на информационно-управляющий комплекс САУ ТП</p> <p>3.5. Подготовка инструкций по эксплуатации, технического описания и регламента работы САУ ТП (в том числе по действиям персонала в предаварийных и аварийных ситуациях)</p> <p>3.6. Разработка рабочей документации на программное и информационное обеспечение САУ ТП</p>
4. Внедрение	<p>4.1. Подготовка объекта к внедрению САУ ТП</p> <p>4.2. Наладка САУ ТП</p> <p>4.3. Опытная эксплуатация САУ ТП</p> <p>4.4. Приемно-сдаточные испытания САУ ТП</p>

	4.5. Сдача САУ ТП государственной (межведомственной, внутриведомственной) комиссии
5. Анализ функционирования	

ся достаточно долго и выполняется по частям, поэтому внедрение начинается до окончания рабочего проектирования – после получения рабочего проекта по комплексу технических средств. Если комплектация (или разработка) оборудования выполняется по частям, например, вначале получается вычислительная техника, то соответственно перестраивается и график монтажа, наладки и внедрения.

Рабочее проектирование может начинаться сразу же после утверждения технического проекта, однако, если разрабатывается нестандартное оборудование, то рабочий проект следует начинать после утверждения документации на это оборудование, а заканчивать – после окончания его разработки.

Работы по созданию САУ ТП могут быть организованы по-разному. Минимизацию затрат на создание САУ ТП при сохранении показателей качества можно добиться следующими мерами:

- рациональное распределение работ между исполнителями;
- обоснованный выбор оборудования;
- типизация и стандартизация всех элементов САУ;
- составление в проекте удобного графика выполнения монтажных работ;
- своевременное материальное обеспечение и сокращения сроков монтажа;
- авторский надзор проекта САУ.

Как отмечалось, основными этапами создания САУ ТП являются **проектирование и внедрение**. Качество проектирования определяет качество САУ ТП, ее эффективность, стоимость, экономичность, надежность, адаптивность и другие показатели. Качество внедрения обеспечивает достижение САУ ТП проектных показателей. Самые удачные проектные решения могут быть опорочены в процессе внедрения, и, наоборот, неудачные решения в процессе внедрения могут быть исправлены. Ошибки проектирования и несоответствие проектных решений изменившейся ситуации могут быть исправлены, но это всегда приводит к дополнительным затратам.

1.3. Промышленные системы автоматизации и управления

Системы автоматизации и управления для технических и технологических объектов принято называть промышленными САУ. В сфере промышленного производства применение нашли САУ следующих трех категорий [5, 9-15 34-37]:

- локальные системы автоматического контроля, регулирования и управления, которые в дальнейшем будут называться локальными САУ;
- централизованные системы автоматического контроля, регулирования и управления, которые в дальнейшем будут называться централизованными САУ;
- автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые в дальнейшем будут называться также как САУ для технологических процессов.

1.3.1. Локальные САУ

Локальные системы автоматизации и управления имеют большое значение в автоматизации производства и предназначены для измерения и контроля параметров процесса, регулирования и управления на нижнем уровне иерархии САУ. Локальные САУ эффективны также при автоматизации технологически независимых объектов с компактным расположением основного оборудования и простыми целями управления (стабилизация, программное управление и т.д.) при хорошо известных, апробированных математических моделях и стационарных условиях эксплуатации, т.е. простых объектов управления. Для создания локальных САУ могут быть использованы как аналоговые, так и цифровые регуляторы.

Типовая структура локальной САУ дана на рис.1.3.1. САУ состоит из контура управления с датчиком D_1 и контура (системы) контроля с датчиком D_2 . В автоматическом режиме работы система контроля служит для дополнительного контроля со стороны ЛПР за работой САУ. Вторичный измерительный преобразователь (ВИП) системы контроля предназначен для визуализации измеренного значения выходной величины в форме, удобной для чтения ЛПР (отклонение стрелки аналогового прибора, показание цифрового прибора и т.д.). Таким образом, ЛПР получает информацию о контролируемых параметрах ОУ от ВИП. Получаемая от ВИП информация также ис-

пользуется ЛПР для выполнения задачи контроля и управления в аварийной ситуации или в режиме ручного управления.

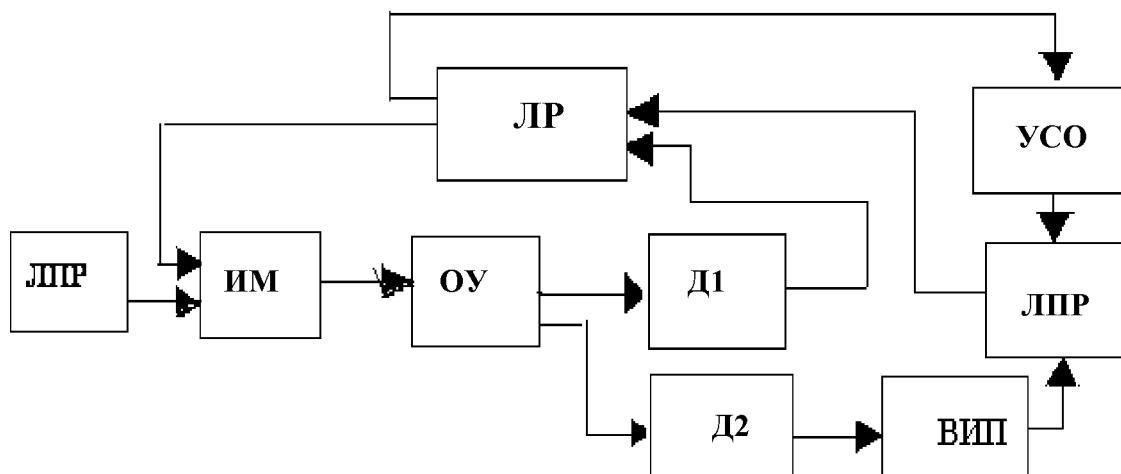


Рисунок 1.3.1. Типовая структура локальной САУ: ОУ – объект управления; Д₁ – датчик системы контроля; Д₂ – датчик системы управления; УСО – устройство связи с оператором (ЛПР); ВИП – вторичный измерительный прибор; ЛПР – лицо, принимающее решение (оператор); ЛР - локальный регулятор; ИМ – исполнительный механизм.

Контур управления соответствует классической структуре автоматических систем управления с обратной связью: содержит датчик Д₁ измеряемой переменной на выходе ОУ, автоматический регулятор, исполнительный механизм, передающий команды управления к рабочему органу, в том числе и от ЛПР в режиме ручного управления. Устройство связи с оператором включает в себя в простейшем случае ВИП, регистрирующие приборы и систему сигнализации, а в случае использования в качестве устройства управления цифрового контроллера - более сложные устройства визуализации, а также преобразующие устройства для приема-передачи измерительной информации и командных сигналов. Наличие ЛПР (человека - оператора) в системе позволяет использовать эту структуру на объектах с невысоким уровнем механизации и надежности технологического оборудования, осуществлять общий контроль за ходом технического процесса и при необходимости вести процесс в режиме ручного управления.

Технологические процессы, протекающие в промышленных агрегатах, находятся под воздействием нежелательных возмущений, которые вызывают отклонения управляемых выходных переменных

процесса от номинальных (регламентных) значений. Чтобы вернуть их к заданным значениям, необходимо изменить материальные и энергетические потоки, поступающие в агрегат. Эти изменения могут быть выполнены с помощью автоматических устройств, которые в совокупности с промышленным агрегатом, образуют систему автоматического управления и регулирования. На рис. 1.3.2. изображена функциональная схема локальной системы автоматического регулирования, которая является составной частью (подсистемой) САУ.

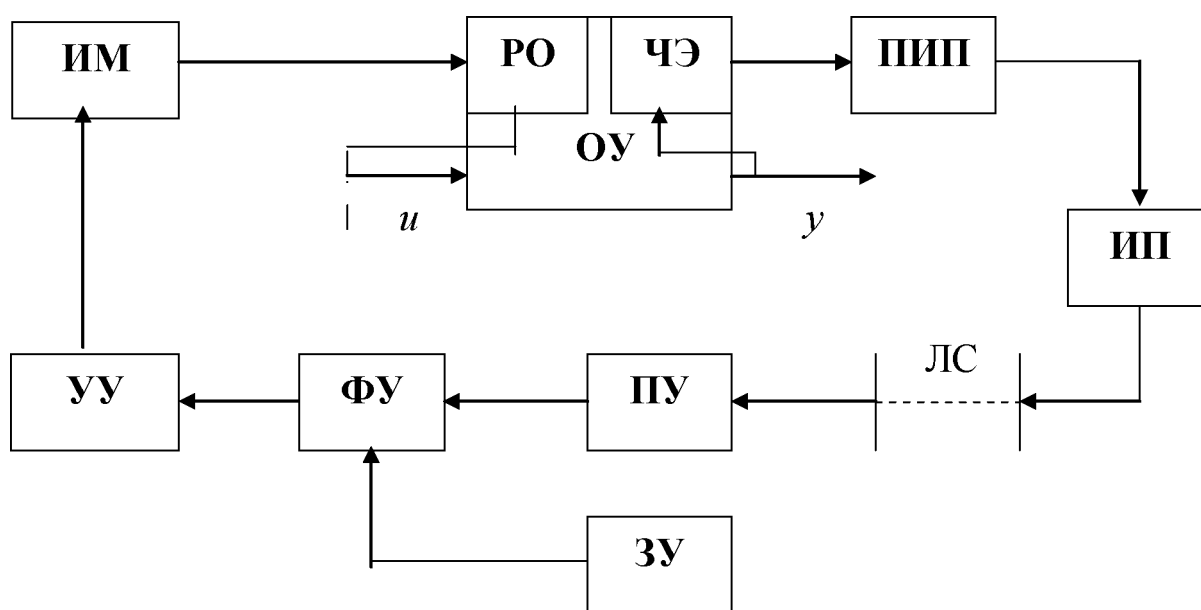


Рисунок 1.3.2. Функциональная схема локальной системы регулирования

На функциональной схеме приняты следующие обозначения: ОУ – объект управления; РО - рабочий орган; ЧЭ - чувствительный элемент; ППП – первичный измерительный преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; ЛС – линия связи; ПУ – преобразующее устройство; ЗУ – задающее устройство; ФУ – формирующее (регулирующее) устройство; УУ – усилительное устройство; ИМ - исполнительный механизм.

Данная функциональная схема соответствует подсистеме управления структуры, приведенной на рис. 1.3.1, и дает подробное представление о том, из каких функциональных элементов она должна состоять. При укрупненном представлении локальная система регулирования содержит всего два элемента: регулируемый объект и автоматический регулятор. Таким образом, все элементы, не относящиеся

к объекту управления, в том числе чувствительный элемент и рабочий орган, образуют автоматический регулятор. Однако во многих случаях приходится делать исключения из данного утверждения т. к. рабочий орган и чувствительный элемент являются встроенными конструктивно составляющими ОУ и поэтому их включают в объект управления [19-23, 26, 28]. Именно эта ситуация приведена на функциональной схеме (рис. 1.3.2).

Входная и выходная величины u , y на реальных промышленных объектах чаще всего представляют собой не сигналы, а количество вещества или энергии. Поэтому величина y для подачи в систему управления или контроля предварительно преобразуется с помощью чувствительного элемента и ПИП. Это процедура преобразования называется измерением величины y . С помощью рабочего органа сигнал управления, выработанный автоматическим регулятором, преобразуется в количество вещества или энергии u , здесь имеет место преобразование обратного характера.

Чувствительный элемент предназначен для преобразования измеряемой величины в другую, функционально связанную с ней величину. Подавляющее большинство измеряемых координат объекта преобразуется в электрические сигналы, механические перемещения или давление газов и жидкостей.

Первичный измерительный преобразователь предназначен для преобразования сигнала на выходе ЧЭ в другой функционально связанный с ним сигнал, который удобно обрабатывать. Выходной сигнал ПИП чаще всего имеет электрическую природу.

Измерительный преобразователь предназначен для преобразований измерительной информации с целью придания ей новых свойств для дальнейшей работы и передачи на расстояние. В функции ИП могут входить унификация, квантование, кодирование и другие операции с сигналом на выходе ПИП. На рис. 1.3.2 указана линия связи ЛС, которую необходимо предусмотреть особенно в случаях использования в локальной САУ в качестве устройства обработки информации микроЭВМ или ПЛК. Заметим, что в схеме с целью ее упрощения не указана ЛС для передачи командных сигналов. Она чаще всего имеет место после ФУ, причем с обеих сторон ЛС должны располагаться преобразующие устройства.

Линия связи предназначена для приема-передачи измерительной информации и командных сигналов. В локальных САУ дальность ЛС может составлять от нескольких метров до нескольких десятков мет-

ров. Для организации ЛС используются стандарты последовательной передачи данных RS-232, RS-423, RS-485.

Преобразующее устройство предназначено для преобразования информации, получаемой по каналу связи в форму, требуемую для восприятия формирующим устройством. Формирующее устройство имеет входную часть, которая является **сумматором** и служит для образования величины рассогласования

$$\varepsilon = g_0 - y,$$

где ε - ошибка управления или рассогласование, g_0 – задающее воздействие, y – выходная величина.

Задающее устройство предназначено для формирования задающего сигнала.

Формирующее устройство (регулирующее устройство) предназначено для преобразования сигнала ε таким образом, чтобы на выходе получить сигнал управления u , согласно заданному закону регулирования. Закон регулирования - это математическая зависимость между выходной величиной регулятора и отклонением ε . Входящие в эту зависимость коэффициенты называются параметрами настройки регулятора. В общем случае закон регулирования представляет собой дифференциальное уравнение, в которое входят не только величина ε , но и производные от нее по времени. ФУ конструируется с учетом динамических свойств исполнительного механизма.

Усилительное устройство усиливает сигнал управления u по величине и мощности до значений, достаточных для приведения в действие исполнительного механизма.

ИМ предназначен для приведения в действие рабочего органа. Чаще всего выходной координатой ИМ является линейное или круговое механическое перемещение выходного вала (штока), который сочленен с рабочим органом.

Рабочий орган предназначен для регулирования количество энергии и/или вещества, подаваемых на объект управления. Различают рабочие органы для энергии, твердых, жидких газообразных и сыпучих веществ.

Объект – это техническое устройство, в котором протекает управляемый процесс.

Объекты САУ обладают различными особенностями: управляемые и регулируемые величины измеряются различными датчиками, для воздействия на РО необходимы различные мощности ИМ, динамические характеристики объектов также весьма различны и часто

существенно изменяются в процессе эксплуатации. Для некоторых объектов создаются специализированные автоматические регуляторы, предназначенные для автоматизации именно этого объекта. Вместе с тем различные по конструкции, габаритам, энергопотреблению, назначению объекты могут обладать схожими динамическими характеристиками или, говоря по другому, имеют одинаковые по виду математические модели. Для таких объектов одинаковые задачи управления могут решаться с использованием одинакового регулятора, так, что чаще всего задачи автоматизации промышленных объектов решаются с помощью универсальных регуляторов общепромышленного назначения. Универсальные регуляторы конструируются таким образом, чтобы их легко можно было приспособить для применения на различных объектах, в том числе изменением числовых значений параметров регулятора.

Промышленным автоматическим регулятором или универсальным линейным регулятором обычно называют управляющее устройство, реализующее пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) закон управления. Отметим основные особенности организации аналоговых (непрерывных) универсальных промышленных регуляторов [31-33, 37,37].

1. Возможность подключения датчиков различных видов. В САУ приходится измерять различные по природе величины, для чего используются также различные по природе и конструкции датчики. По свойствам выходного сигнала датчика их можно разбить на две группы: 1) датчики с **естественным (неунифицированным)** выходным сигналом, 2) датчики с **унифицированным** выходным сигналом. Для подключения датчиков к автоматическому регулятору используется один из трех принципов построения регулятора: аппаратный, приборный, агрегатный.

При **аппаратном принципе** построения датчик регулятора представляет собой специальное устройство, не связанное с системой контроля. Входная часть автоматического регулятора в этом случае выполняется сменной, что позволяет подключать к нему различные датчики.

При использовании **приборного принципа** датчик системы управления присоединяется к вторичному измерительному прибору. Перемещение стрелки прибора через специальный преобразователь подается на измерительное устройство автоматического регулятора. Часто датчик регулятора также встраивается в измерительный при-

бор и в этом случае на регулятор подается сигнал рассогласования.

Агрегатный принцип построения используется при стандартных (унифицированных) сигналах на выходе датчиков. Такой принцип рекомендован основными положениями организации агрегатно-модульных систем и позволяет подключать любой датчик с унифицированным сигналом непосредственно к унифицированному входу автоматического регулятора.

Приборный принцип построения автоматического регулятора, как и агрегатный, позволяет использовать одну и ту же конструкцию регулирующего устройства для подключения к различным типам датчикам и не конструировать специальных датчиков для системы регулирования. Однако аппаратный принцип по сравнению с приборным позволяет получить некоторую дополнительную надежность системы регулирования благодаря наличию системы контроля с собственным датчиком. Необходимый класс точности датчиков для систем регулирования обычно ниже, чем для систем контроля, поэтому аппаратный принцип позволяет использовать более простые и надежные датчики в системах регулирования. Дополнительная инерция прибора обычно несколько ухудшает динамические свойства контура регулирования при приборном принципе подключения.

2. Возможность формирования сигнала задания. Задающее воздействие формируются задающими устройствами или задатчиками, как их еще называют. Задатчики встраиваются в приборы контроля при приборном принципе подключения датчиков. Когда в регуляторе реализован аппаратный или агрегатный принцип подключения датчиков задатчики представляют собой самостоятельные устройства или встраиваются в автоматический регулятор. Точность воспроизведения сигнала задания должно быть не ниже точности датчика.

3. Возможность изменения закона управления и параметров регулятора. При аппаратной реализации регуляторов обеспечение необходимой точности воспроизведения заданного закона регулирования является важной проблемой. Это объясняется различием динамических характеристик различных промышленных объектов и разнообразием технологических требований к допустимым величинам отклонений регулируемых переменных. При этом качество регулирования существенно зависит от точности воспроизведения заданного закона регулирования. Для регулятора проблема точности реализации заданного закона при различных параметрах настройки является основной и связана с его структурой, характеристиками реальных эле-

ментов, которые обладают ограниченной полосой пропускания, нелинейными особенностями и изменяют свои характеристики в зависимости от внешних условий.

В аналоговых регуляторах изменение закона управления достигается изменением структуры построения регулятора. Проблема выбора необходимой структуры регулятора решается в рамках задачи структурного синтеза закона управления. В стандартных промышленных регуляторах обычно предусматривается возможность изменения параметров регулятора в заранее предусмотренных пределах. Проблема выбора требуемых значений параметров регулятора является задачей параметрического синтеза (параметрической оптимизации) закона управления.

4. Необходимость обеспечения достаточной мощности выходного сигнала регулятора. Управляющий сигнал, вырабатываемый автоматическим регулятором, через исполнительный механизм подается на регулирующий орган. Усилия, необходимые для перемещения РО, достигают от нескольких грамм до нескольких тонн. В таких же пределах должны быть мощности ИМ, которые приводят в действие РО. Создан номенклатурный ряд ИМ различной мощности. Для подключения к ним одного и того же автоматического регулятора используется усилительное устройство.

5. Безударный переход с режима ручного управления на автоматический и обратно. В режиме автоматического управления **безударный переход** с внешнего источника сигнала задания на внутренний и наоборот. Внешним источником задающего воздействия является вышестоящий уровень САУ в многоуровневых иерархических САУ. Безударный переход при переключении режимов работы обозначает отсутствие дополнительных переходных процессов в системе.

6. Ограничение выходного аналогового сигнала по верхнему и нижнему уровням и сигнализация предельных значений этих уровней.

7. Гальваническое разделение (развязка) входных и выходных цепей. Это необходимо для устранения дополнительных помех, повышения надежности автоматического регулятора.

8. Связь с УВМ верхнего уровня иерархии. Такая возможность должна быть заложена в регуляторах, что важно при работе регулятора в составе сложной многоуровневой системы. Связь с УВМ вышестоящего уровня является двунаправленной: от регулятора УВМ

передается информация о состоянии локальной САУ, а от УВМ регулятору – новое значение задающего воздействия и возможно, параметров регулятора.

9. Аналоговая и дискретная автоматическая подстройка параметров регулятора. Это необходимо для обеспечения автоматического приспособления регулятора к работе при изменившихся новых условиях. Такие системы (регуляторы), способные автоматически изменять свои возможности называются адаптивными. Для построения адаптивных систем управления в системе необходимо предусмотреть контур адаптации, в котором на основе измеренных значений входных, выходных переменных автоматически решается задача структурного или параметрического синтеза закона управления, а в регуляторе – возможность автоматического изменения структуры и параметров закона управления.

1.3.2. Централизованные САУ

Централизованные САУ представляют автоматические или автоматизированные системы, предназначенные для сбора и обработки данных об объекте управления и выработки на их основе управляющих воздействий для достижения цели управления. Появление этого класса САУ связано с увеличением числа контролируемых и регулируемых параметров, с территориальной рассредоточенностью ОУ. Для централизованных САУ характерны дистанционный контроль, регулирование и управление, что позволяет территориально отделить наблюдение и управление от ОУ. Изменился и состав функций: кроме функций, свойственных локальным САУ, появились функции дистанционного управления (ДУ), логико-командного управления (ЛКУ).

Для сокращения количества необходимого оборудования и уменьшения эксплуатационных расходов применяются многоканальные средства контроля и регулирования.

На рис. 1.3.3 приняты следующие обозначения: ЗУ – задающие устройства, КК – коммутатор каналов, МВП – многоканальные вторичные приборы, МЛКУ – многоканальное логико-командное управления, МРУ – многоканальное регулирование и управление, РК - распределитель каналов, ИУ – исполнительное устройство, ИМ - исполнительные механизмы, ОУ – объекты управления, Д - датчики.

Территориальная рассредоточенность ОУ и необходимость тер-

риториального отделения центрального пульта контроля и управления (ЦПКУ) имеет место на средних и крупных промышленных предприятиях, которые могут размещаться на площадях в сотни и тысячи квадратных метров. Производственные процессы на таких предприятиях обеспечивают многочисленные технические установки и устройства, работу которых необходимо контролировать, координировать и управлять. Для выполнения этих задач образуются группы сравнительно компактно расположенных объектов, которые будут обслуживаться одним многоканальным прибором. Контроль и управление всеми группами объектов осуществляется с ЦПКУ.

Каждый объект имеет свой датчик и исполнительный механизм. Для приема измерительной информации с датчиков применяется многоканальный вторичный прибор (МВП). Измерительная информация от датчиков к МВП поступает через коммутатор каналов КК – устройство для передачи сигналов с нескольких входных цепей на единственный выход, т. е. это устройство, у которого несколько входов и один выход. Передача сигналов от входа к выходу идет по определенным правилам, например, путем последовательного опроса. МВП может отображать, регистрировать, запоминать измерительную информацию и передавать ее дальше на специальные средства отображения информации (МКИП, мнемосхемы, табло), которые обеспечивают группировку, наглядность, красочность и масштабность представления измерительной информации, обеспечивая оператору большие удобства в работе.

ЦПКУ является рабочим местом ЛПР, который имеет непосредственную визуальную, акустическую связь со специальными средствами отображения информации. На ЦПКУ формируются все команды управления ОУ. МРУ осуществляется с помощью многоканального автоматического регулятора, что может иметь место лишь в цифровом базисе. Задания для МРУ формируются ЗУ, работа которых контролируется на ЦПКУ. МЛКУ имеет две составляющие: логического управления и командного (дистанционного) управления. Суть логического управления состоит в том, команда управления вырабатывается только при наступлении определенных условий, причем разные условия отмечаются соответственно разными командами. Теоретической основой логического управления служит булева алгебра. Команды дистанционного управления вырабатываются ЛПР. Командные сигналы от ЦПКУ устройствам МЛКУ и МРУ передаются через КК. Сигналы управления от устройств МЛКУ и МРУ к ИМ пе-

редаются с помощью РК – устройства, который имеет один вход и несколько выходов. Так как исполнительных механизмов столько, сколько объектов управления, то таким образом через рабочий орган каждого ОУ осуществляется управление входной величиной. Состояние и положение исполнительных механизмов передается через КК на ЦПКУ и контролируется ЛПР.

Следует сказать, что выходные величины измеряются МВП не одновременно (это невозможно), а в определенной последовательности или по выбору ЛПР. То же самое можно сказать о выработке и приведении в действие команд управления. Выработанные устройствами МЛКУ и МРУ команды поочередно с помощью распределителя каналов РК передаются на исполнительные устройства и механизмы.

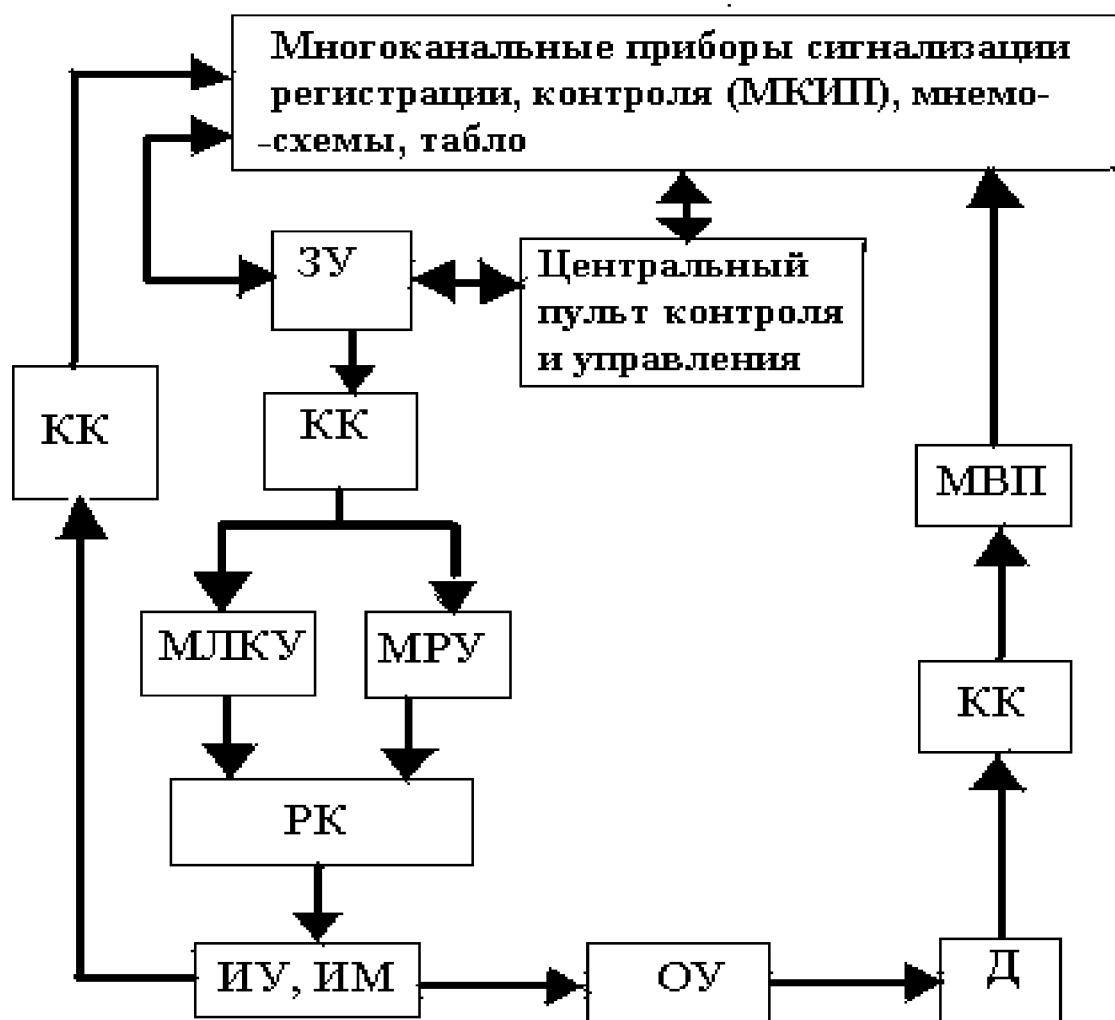


Рисунок 1.3.3. Типовая структура централизованной САУ.

1.3.3. САУ технологическими процессами

Развитие средств вычислительной техники и экономико-математических методов управления позволило создать человеко-машинные системы управления технологическими процессами [1-15].

Согласно ГОСТ 20.003-84 САУ технологическими процессами предназначены для выработки и реализации управляющих воздействий на технологическом объекте управления (ТОУ) и представляют собой человеко-машинные системы, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления ТОУ. Эти системы известны также как автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Безусловным элементом АСУ ТП является управляющая вычислительная машина (УВМ), которая выполняет роль многоканального устройства обработки информации и принятия решения. Совместно функционирующие ТОУ и АСУ ТП образуют автоматизированный технологический комплекс (АТК). Функциональная структура АТК приведена на рис. 1.3.4.

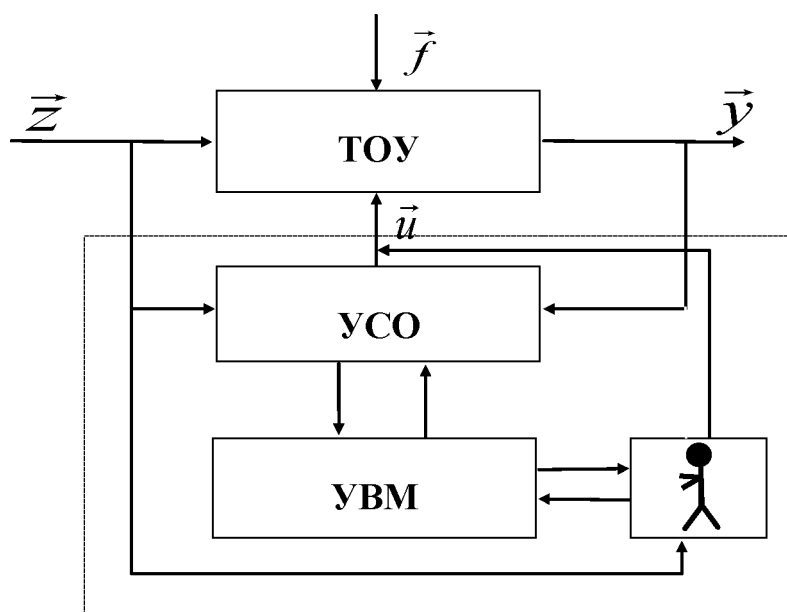


Рисунок 1.3.4. Функциональная структура АСУ ТП

ТОУ - это совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям и регламентам технологического процесса производства.

К ТОУ относятся:

- 1) технологические агрегаты и установки (группы станков), реа-

лизующие самостоятельный технологический процесс;

2) отдельные производства (цехи, участки) и производственный процесс всего промышленного предприятия, если управление этим производством носит в основном технологический характер, т.е. заключается в реализации рациональных режимов взаимосвязанных агрегатов (участков, производств).

По принципу построения (структуре) различают централизованные АСУ ТП, АСУ ТП с супервизорным управлением и децентрализованные распределенные АСУ ТП.

Следует различать три режима функционирования АСУ ТП.

1. Информационный режим. В этом режиме УВМ используется для сбора, хранения, обработки информации и представления ее в удобной форме оператору, например на мнемосхемах, табло, транспарантах и экране монитора. УВМ решает задачи контроля, коррекции и линеаризации показателей датчиков, масштабирования и фильтрации измерительной информации, расчета технико-экономических показателей т. д. Решение по управлению ТОУ на основании полученной от УВМ информации принимает ЛПР.

2. Режим советчика оператора. В этом режиме УВМ выполняет все функции информационного режима, а также определяет значения управляющих воздействий при каждом такте квантования системы, реализация которых должна привести к оптимизации режима работы объекта и его более эффективному функционированию. Однако эти управляющие воздействия не подаются непосредственно на управляющие органы, а выдаются в виде "совета" оператору, который и принимает окончательное решение о наиболее целесообразном воздействии на органы управления.

3. Автоматический режим. Автоматический режим реализации функций АСУ ТП предусматривает автоматическую выработку и реализацию управляющих воздействий на основе измерительной информации от датчиков, которые поступает в УВМ через УСО. При этом ЛПР вмешивается в работу АСУ ТП лишь в ограниченных случаях, связанных с переводом АТК в другой режим работы или с угрозой возникновения предаварийной или аварийной ситуации. Для автоматического режима различают прямое цифровое (автоматическое) управление и косвенное автоматическое управление.

Косвенное автоматическое управление имеет место, когда УВМ автоматически изменяет уставки и/или параметры настройки для локальных САУ, которые функционируют в составе АСУ ТП. Система

управления ТОУ строится таким образом, что УВМ включается в контур автоматического управления, выполняя функции задающего устройства и устройства автоматической подстройки структуры и/или параметров локального автоматического регулятора. Режим косвенного автоматического управления возможен в АСУ ТП с супервизорной структурой.

Прямое цифровое управление (ПЦУ) имеет место, когда УВМ формирует управляющие воздействия для каждого объекта с автоматической подачей их непосредственно на соответствующие исполнительные механизмы. Режим возможен при централизованной структуре построения АСУ ТП. Этот режим позволяет перейти от автоматизированного управления к автоматическому, когда на УВМ возлагаются все функции контроля, регулирования и управления объектом. Управляющие воздействия \vec{u} , рассчитанные УВМ на основе поступающей с объекта информации, подаются на ОУ непосредственно через УСО, минуя человека-оператора. Очевидно, что указанный режим функционирования предполагает высокую степень технической оснащенности ОУ.

Приведенные режимы работы можно рассматривать также как этапы развития АСУ ТП, когда ее развертывание, внедрение и усовершенствование происходит путем постепенного усложнения функций и задач, возлагаемых на УВМ, и перехода на более высокие уровни автоматизации обработки информации и управления.

В настоящее время ЭВМ стал одним из основных элементов реализации информационных технологий, которые связаны с добыванием, приемо-передачей, преобразованием, хранением и обработкой информации. Безусловно, технологии обработки массивов информации отличаются от технологий обработки измерительной информации. Вместе с тем современный уровень развития микроэлектроники позволяет добиваться таких высоких частот переключения в ЭВМ, что вычислительное устройство одновременно может выполнять несколько задач, например задачу управления в составе АСУ ТП и в то же время задачу обработки информационного массива.

Кроме того, следует отметить, что четкой границы между компьютерами бизнес-класса и компьютерами для научно-технических расчетов уже невозможно указать, т. к. технические характеристики даже современных **персональных компьютеров** настолько высоки, что их можно применять для решения практически любого класса задач. Несмотря на это использование ЭВМ преимущественно для обработки

информации отличается следующими признаками:

- большой объем вводимой и выводимой информации;
- необходимость преобразования исходной информации при вводе из нечисловой в числовую сферу;
- применение для решения задач обработки информации специфического математического аппарата (теории массового обслуживания, теории вероятностей, теории игр и т. д.) и достаточно сложных алгоритмов сортировки информации;
- вывод обработанной информации в специфической форме - форме таблиц и отчетов.

1.4 Организация и классификация компьютерных систем автоматизации и управления

1.4.1. Организация компьютерных САУ

Рассмотрим организационную структуру САУ сложными (большими) объектами, отличительной чертой которых является наличие в составе САУ УВМ как многоканального средства сбора, преобразования, хранения и обработки информации. САУ, как отмечалось ранее, выполняет функции контроля, сигнализации, управления и аварийного управления. Большие объекты включают в себя множество мелких (локальных или простых) объектов.

По организационной структуре (принципу построения) различают централизованные, супервизорные и децентрализованные распределенные (иерархические) САУ.

Структура **централизованной САУ** дана на рис. 1.4.1. Эта структура характеризуется тем, что в ее составе есть лишь одно центральное вычислительное устройство – УВМ, которая выполняет роль многоканального автоматического регулятора и устройства обработки информации. УВМ может иметь реализацию в виде промышленного компьютера или мощного ПЛК. В памяти УВМ хранятся возможные законы управления для каждого объекта, измерительная информация от которых поступает к УВМ через датчики и УСО в определенной последовательности. В такой же последовательности УВМ вырабатывает управляющий сигнал для каждого объекта, который через УСО передается исполнительным механизмам. На УСО возлагаются ряд функций: аналого-цифровое преобразование сигнала датчиков, цифро-аналоговое преобразование командных кодов, коммутация и рас-

пределение сигналов. Кроме того, УСО может выполнять задачи предварительной обработки измерительной информации от датчиков: усиления, линеаризации, масштабирования, фильтрации, коррекции. УСО может быть как самостоятельным устройством, так и встроенным в УВМ и представлять ее функциональный узел.

ЛПР имеет возможность получать информацию о работе САУ через УВМ с помощью системы отображения информации и активно воздействовать на процессы управления объектами. Права и обязанности ЛПР зависят от режима работы САУ.

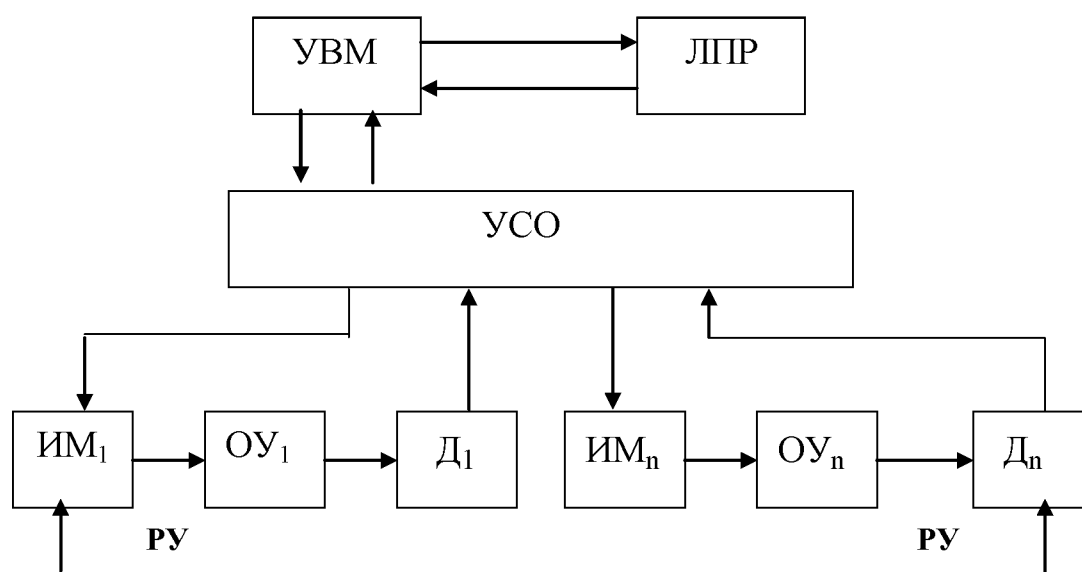


Рисунок 1.4.1. Централизованная САУ: УВМ - управляющая вычислительная машина; ЛПР – лицо, принимающее решение; УСО - устройство связи с объектом; $Д_1 \dots Д_n$ – датчики для измерения управляемых переменных; $ОУ_1 \dots ОУ_n$ – локальные объекты управления; $ИМ_1 \dots ИМ_n$ – исполнительные механизмы; РУ – ручное управление.

Позитивный момент применения такой структуры САУ заключается в ее экономичности. Однако недостаток заключается в пониженной надежности САУ, т. к. выход УВМ из строя приводит к аварийной ситуации для всей системы. В принципе возможен переход ручному управлению. Это приводит не только к замедлению темпа работы системы, но и к повышению риска возникновения аварийных ситуаций, в особенности для больших объектов реального времени. Потому что за допустимое время сложная задача координации работы нижнего уровня САУ может быть не решена.

Структурная организация **супервизорной САУ** (рис. 1.4.2) показывает, что эта система иерархическая двухуровневая, нижний уровень которой составляют локальные САУ. На нижнем уровне задача управления объектом решается локальным автоматическим регулятором. На верхний уровень передается информация о состоянии каждого объекта и выполнении задач управления нижнего уровня. Верхний уровень с УВМ выполняет задачи:

- выработки значений уставок (задающего воздействия);
- координации работы объектов нижнего уровня;
- отображение информации для ЛПР.

Локальные САУ нижнего уровня работают автономно, обрабатывая задачу управления согласно полученным уставкам с верхнего уровня. Система отображения информации верхнего уровня выставляет ЛПР информацию о состоянии элементов нижнего уровня, о положении исполнительных механизмов, о текущем значении управляемых переменных и их допустимых (граничных) значениях. При нарушении границы (интервала) допустимых значений вырабатывается тревожная сигнализация и включаются программы аварийного управления.

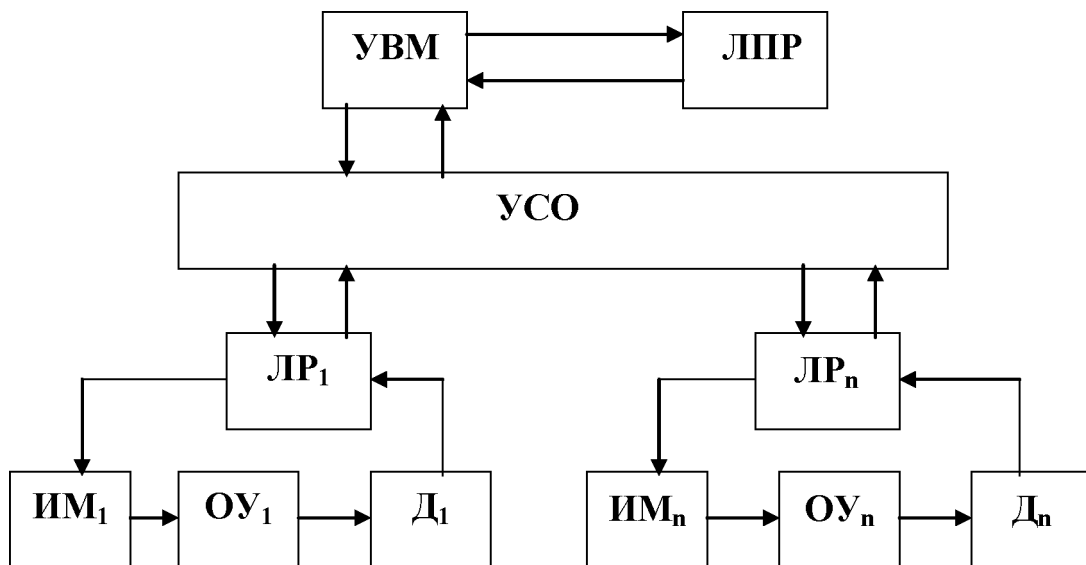


Рисунок 1.4.2. Супервизорная структура построения САУ: ЛР₁- ЛР_n - локальные автоматические регуляторы; ИМ₁- ИМ_n – исполнительные механизмы; ОУ₁- ОУ_n – объекты управления; Д₁- Д_n - датчики.

Таким образом, на верхнем уровне решаются задачи:

- управления множеством распределенных объектов;

- контроля управляемых переменных объектов и состояния элементов САУ;
- отображения информации;
- сигнализации о состоянии объектов, элементов САУ и контролируемых и управляемых переменных;
- аварийного управления;
- координации работы нижнего уровня.

При отказе локального автоматического регулятора управления на нижнем уровне осуществляется в ручном режиме через исполнительный механизм. Отказ УВМ не нарушает работу нижнего уровня, который обладает относительной автономностью, т. е. не приводит к отказу САУ в целом. С этой позиции надежность супервизорной САУ выше чем надежность централизованной САУ, однако супервизорная САУ менее экономична, т. к. из-за наличия локальных регуляторов имеет место аппаратурная избыточность.

Хотя супервизорная САУ имеет автономно работающий нижний уровень, возникновение неполадок в УВМ все таки приводит к затруднению работы САУ, т. к. становится невозможным выполнение задачи отображения информации и сигнализации в центральном пункте контроля и управления. Кроме того, задача координации не может быть решена в автоматическом режиме, что по-прежнему грозит возникновением аварийной ситуации.

Децентрализованные иерархические САУ (рис. 1.4.3) возникли по следующим причинам:

- централизованный и супервизорный принципы организации САУ не обеспечивают высокой надежности, потому что выход из строя УВМ влечет за собой серьезные последствия, хотя менее тяжкие для супервизорных САУ;
- с ростом количества объектов и расстояния от них до УВМ увеличивается время реакции системы, что может привести к существенному уменьшению быстродействия САУ в целом;
- количество объектов и сложность решаемых САУ задач может оказаться таким, что одна управляющая вычислительная машина может с ними не справиться.

Сильная рассредоточенность объектов, кроме того побуждает к **территориальной декомпозиции объектов**, что обозначает объединение объектов в группы по территориальному признаку. Каждая группа объектов может обслуживаться отдельной УВМ, которая поставляет информацию центральной УВМ и получает инструкции от

нее. Таким образом, центральное вычислительное устройство, которое значительно разгружено от объемов задач УВМ нижестоящих уровней, координирует работу всей САУ. Хотя такая структура при проектировании и эксплуатации требует существенно больших затрат по сравнению с предыдущими структурами, она обладает высокой степенью надежности и является наиболее подходящей при сильной рассредоточенности объектов. Децентрализованные иерархические САУ могут иметь более двух уровней и организованы

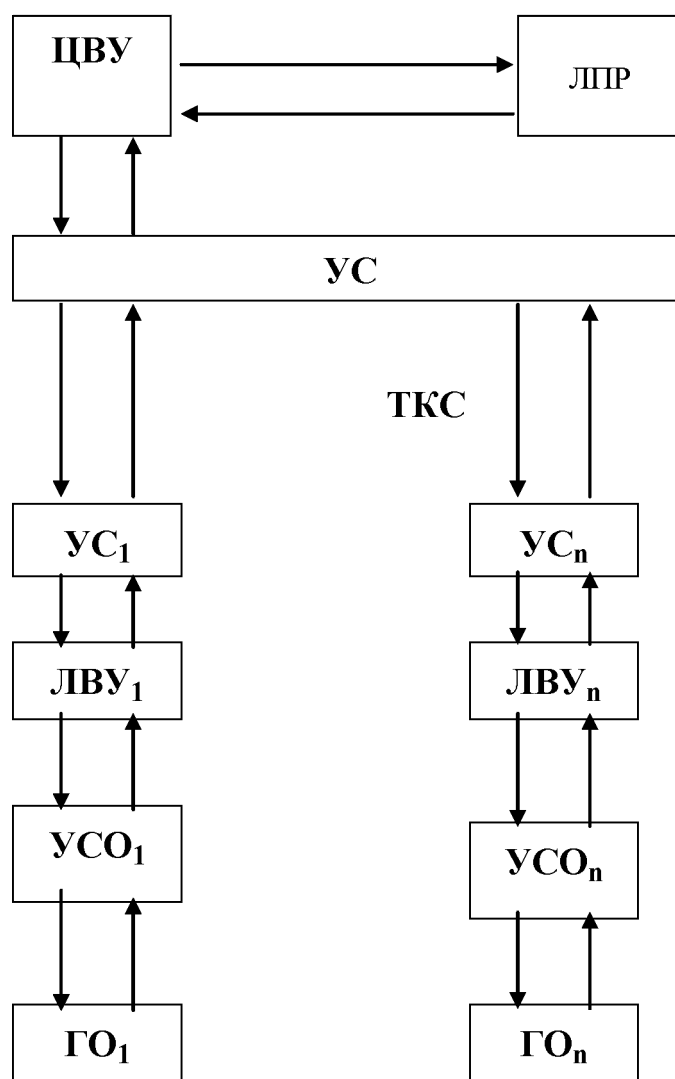


Рисунок 1.4.3. Децентрализованные иерархические САУ: ЦВУ - центральное вычислительное устройство; ЛВУ₁ ... ЛВУ_n- локальные вычислительные устройства; УСО₁ ... УСО_n – устройства связи с объектом; ГО₁ ... ГО_n- группы локальных объектов.

по магистральной, кольцевой или древовидной топологии [43-46,53,

55]. Для организации распределенных САУ требуются также современные средства связи (приема-передачи информации) между вычислительными устройствами. Существующие агрегатные комплексы средств автоматизации позволяют использовать любые телекоммуникационные каналы и линии передачи информации (оптические, проводные, беспроводные и т. п. каналы связи).

Система, которая приведена на рис. 1.4.3 содержит ЦВУ, на которое возложено решение следующих задач:

- отображение информации, сигнализация и контроль управляемых переменных объектов и состояния элементов САУ;
- координации работы нижнего уровня.
- аварийное управление в случае выхода из строя одного или нескольких ЛВУ.

ЛВУ осуществляет функции контроля и управления группы локальных объектов, обмениваясь с ними информацией через УСО. ЛВУ и ЦВУ связаны между собой с помощью устройств связи УС (адаптеров) и телекоммуникационного канала связи ТКС. Современные САУ с цифровыми контроллерами могут быть организованы на базе всех тех структур, которые характерны для компьютерных сетей: «шина» (линейная структура), «кольцо», «звезда», «дерево», «сетка». Показанная на рисунке 1.4.3. структура соответствует древовидной топологии. Надежность распределенных САУ выше, чем у САУ, организованных по централизованной или супервизорной структуре.

Примерами сильно рассредоточенных объектов являются трубопроводный транспорт, который используется для транспортировки нефти и газа, система водораспределения и водопользования, система очистных сооружений в курортных зонах, в частности вокруг озера Иссык-Куль. Все эти объекты обладают явно выраженными признаками территориальной распределенности. Однако систему распределенных объектов можно найти и на всех крупных промышленных предприятиях и электроэнергетике, транспорте. Гиро- и теплоэлектростанции, высоковольтные линии электропередачи (ВЛЭП), используемые для транспортировки электроэнергии, и система распределения электроэнергии по потребителям также являются территориально сильно рассредоточенными объектами.

Распределенные децентрализованные САУ являются результатом не только территориальной, но и структурной декомпозиции сложного объекта управления.

1.4.2. Декомпозиция САУ

САУ большими объектами представляют сложные системы, для которых часто трудно или даже невозможно разработать формальное описание. Тем не менее по отношению к сложным системам ставятся задачи анализа, синтеза и моделирования. При этом основной подход в решении поставленных задач заключается в поиске разумного упрощения описания сложных САУ. Сложные САУ формализуются с использованием различных по виду моделей (языков) - словесных (вербальных), математических, моделей в виде схем, графиков, таблиц.

Модели сложного САУ получают путем декомпозиции, когда она делится на ряд более простых, относительно самостоятельных, но взаимосвязанных между собой составных частей. Каждая часть (подсистема) САУ имеет самостоятельную цель функционирования, а достижение целей всех составных частей приводит к выполнению общей цели функционирования САУ. Такой подход во многих случаях позволяет решить задачи синтеза, анализа и моделирования, т. к. подсистемы САУ имеют меньшую сложность и размерность.

Метод декомпозиции является мощным методом разработки САУ, хотя при этом возникают и ряд проблем.

Первый вопрос, который возникает при декомпозиции – это как, по каким критериям разделить систему на более простые подсистемы с меньшим числом входных и выходных переменных. При решении этого вопроса придерживаются принципа системного подхода, когда разделение производится в рамках определенной классификации, к примеру, по функциям управления, по территориальному расположению, по структуре управления и т. д. В некоторых случаях САУ подвергается многократной декомпозиции.

Функциональными подсистемами при декомпозиции по функциям управления могут быть подсистема контроля, подсистема управления, подсистема отображения информации и т. д. Один из вариантов декомпозиции САУ по функциональному признаку приводится на рис. 1.4.4. Декомпозиция САУ по территориальному признаку хорошо прослеживается на примере децентрализованной иерархической САУ (см. рис. 1.4.3). При декомпозиции по структурному признаку принимается во внимание организационная структура объекта, например, оборудование – группа оборудования – цех – предприятие.

Второй сложный момент при декомпозиции – это декомпозиция

общего критерия качества. Это является задачей, которая возникает достаточно естественным образом. Сложная САУ имеет цель функционирования, которая формализованно выражена в виде некоторого критерия качества - целевой функции. Разделение САУ на подсистемы приводит к необходимости разделения и целевой функции, т. к. каждой подсистеме необходимо указать задачу ее функционирования с учетом того, что выполнение частных (локальных) целей должно привести к выполнению общей цели САУ.

Третья проблема декомпозиции – это выработка общей стратегии управления подсистемами САУ или решение задачи координации работы подсистем.



Рисунок 1.4.4. Функциональные подсистемы САУ.

1.4.3. Классификация компьютерных САУ

Разработка и внедрение компьютерных САУ ТП требует определения места САУ ТП в общей структуре САУ предприятием. САУ предприятием, как правило, является многоуровневой системой со следующими характерными особенностями:

- 1) элементы верхнего уровня связаны с более крупными подсистемами и обрабатывают информацию за большие периоды времени;
- 2) элементы верхнего уровня управления системой связаны с более медленными процессами;
- 3) задачи верхнего уровня более трудны для количественной формализации; принятие решения в верхнем уровне наиболее сложно.

В общем случае САУ ТП представляет собой многоуровневую иерархическую систему, которая в свою очередь является подсистемой САУ предприятием (САУП) или автоматизированной системы управления предприятием (АСУП). На рис. 1.4.5 приведена функциональная структура трехуровневой САУ.

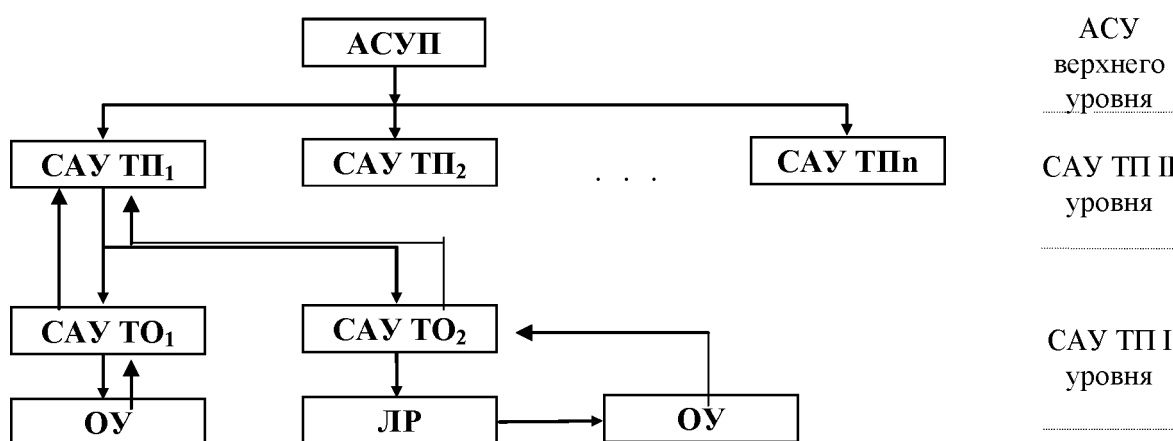


Рисунок 1.4.5. Многоуровневая иерархическая САУ

Нижний (первый) уровень АСУП состоит из множества систем управления отдельными технологическими (техническими) операциями (САУ ТО), при этом эти системы можно разбить на два вида:

- 1) САУ ТО, в котором осуществляется прямое цифровое управление от УВМ (см. САУ ТО₁);

- 2) САУ ТО, в котором управление осуществляется с помощью локального автоматического регулятора ЛР (см. САУ ТО₂).

В последнем случае расчет уставок регуляторов, а также автоматическое изменение параметров настроек регуляторов может быть возло-

жена на УВМ.

Второй уровень АСУП или верхний уровень САУ ТП включает в себя комплексное управление процессами производства отдельных изделий (технических процессов или ТП), т. е. речь идет о управлении группой технологических агрегатов, технологической линией, производственным участком. Каждый ТП состоит из ряда технологических операций, а задача управления второго уровня заключается в оптимизации параллельно - последовательного выполнения производственных операций по времени и качеству и сводится к следующему:

- 1) расчет изменения хода ТП в целом;
- 2) реализация рассчитанного хода ТП;
- 3) выработка графика прохождения взаимосвязанных процессов через узловые точки, т.е. оперативное управление ходом производственного процесса на уровне цеха, и связь с верхним уровнем САУ.

Верхний (третий) уровень САУ – АСУП является системой организационного характера, где решаются задачи организации управления промышленным предприятием. Перечислим эти задачи:

- управление системой технологической подготовки производства, что является необходимой предварительной процедурой при новой продукции;
- управление внутренней и внешней транспортной системой для обеспечения промышленного производства сырьем, комплектующими, полуфабрикатами и сбыта готовой продукции;
 - управление складским хозяйством;
 - маркетинг и менеджмент для реализации готовой продукции;
 - управление системой подготовки и переподготовки кадров;
 - управление финансово-экономическими службами предприятия;
 - организация и управление системой промышленных испытаний;
 - организация и управление научными исследованиями;
 - организация и управление системой проектирования производственных процессов и новых изделий;

Для планирования основных видов ресурсов, обеспечивающих проектирование и эксплуатацию САУ ТП, оценки ее места и научно-технического уровня, а также для планирования работ по дальнейшему совершенствованию САУ ТП разработана ее классификация [2-4]. Документ [4] в литературе часто обозначают как ОРММ-2 АСУ ТП. Ниже приводится классификация САУ ТП, согласно ОРММ-2, где приняты следующие **признаки** классификации:

- уровень в структуре управления, в которой создается САУ ТП;
- характер протекания во времени процессов в ОУ;
- показатель условной информационной мощности ОУ;
- уровень функциональной надежности САУ ТП;
- тип функционирования САУ ТП.

По **уровню**, занимаемому в структуре АСУП, САУ ТП делятся на 3 класса (табл.1.4.1). К **первому классу** относятся САУ ТП, управляющие отдельными агрегатами и установками, либо участками производства. К **второму классу** относятся САУ ТП, управляющие группами установок, цехами, производствами, в которых отдельные участки (агрегаты, установки) имеют свои локальные системы управления, но не оснащенные САУ ТП первого класса. К **третьему классу** относятся САУ ТП, объединяющие в своем составе САУ ТП первых двух классов и реализующие согласованное управление отдельными технологическими установками и их совокупностью (цехом, производством), исключая вспомогательные и обеспечивающие службы и производства.

Таблица 1.4.1

Класс САУ ТП	Кодовый индекс	Характеристика ОУ
САУ ТП нижнего уровня	1	Технологические агрегаты, установки, участки
САУ ТП верхнего уровня	2	Группы установок, цехи, производства, не имеющие в составе САУ ТП нижнего уровня
САУ ТП многоуровневые	3	Группы установок, цехи, производства, имеющие в составе САУ ТП нижнего уровня

Характер протекания управляемого ТП во времени определяется характером поступления сырья и реагентов, особенностями установившихся и переходных режимов, характером операций по переработке входных потоков материалов и энергии. Различают три (табл.1.4.2) класса: непрерывные САУ, непрерывно-дискретные САУ и дискретные САУ.

В непрерывных САУ процессы в ОУ носят непрерывный характер, с длительным поддержанием режимов, близких к установившимся, и практически безостановочной подачей сырья и реагентов.

В непрерывно-дискретных САУ ОУ представлен как совокупность

непрерывных и прерывистых, в том числе периодических, процессов на различных технических агрегатах или различных стадиях работы предприятия.

В дискретных САУ в ОУ имеют место прерывистые (дискретные) процессы с несущественной для управления длительностью технологических операций.

Таблица 1.4.2

Класс САУ ТП	Кодовый индекс	Характер процессов в ОУ
Непрерывные САУ	Н	Непрерывный
Непрерывно-дискретные САУ	П	Сочетание непрерывных и прерывистых процессов
Дискретные САУ	Д	Прерывистый (дискретный)

Условная информационная мощность ОУ характеризуется числом входных и выходных переменных, измеряемых, контролируемых и управляемых САУ ТП. По этому признаку различают 5 классов (табл.1.4.3) САУ ТП: 1) наименьшей мощности; 2) малой мощности; 3) средней мощности; 4) повышенной мощности; 5) большой мощности.

Таблица 1.4.3

Условная информационная мощность САУ	Кодовый индекс	Число параметров	
		минимальное	максимальное
Наименьшая	1	10	40
Малая	2	41	160
Средняя	3	161	650
Повышенная	4	651	2500
Большая	5	2501	и более

Различают три **уровня функциональной надежности** (табл. 1.4.4): минимальный, средний и высокий. Надежность – это свойство системы выполнять возложенные на нее задачи с соблюдением всех требуемых показателей. Надежность характеризуется следующими составляющими: безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность. Количественными показателями надежности являются время безотказной работы, время восстановления работоспособности, время сохранения системой своих технических характеристик при хранении, время от начала эксплуатации САУ до ее перехода в предельное состояние. Предельным называют такое состояние САУ, при котором ее эксплуатация либо технически невозможна, либо эко-

номически невыгодна.

Таблица 1.4.4

Уровень функциональной надежности	Кодовый индекс	Краткая характеристика особенностей функционирования системы
Минимальный	1	
Средний	2	
Высокий	3	

По типу функционирования САУ ТП делятся на 4 класса (табл.1.4.5): 1) САУ ТП информационного класса; 2) САУ ТП советующего класса; 3) САУ ТП локально-автоматического класса; 4) автоматические САУ ТП.

Таблица 1.4.5

Тип функционирования САУ ТП	Кодовый индекс	Краткая характеристика особенностей функционирования системы
Информационный	И	Информационные функции
Советующий	С	Функции: информационные и советчика оператора
Локально-автоматический	Л	Функции: информационные, советчика оператора и автоматического локального управления
Автоматический	А	Всеет функции, включая управление

Эти классы САУ отражают режимы работы САУ ТП. В **информационных** САУ автоматически выполняются только информационные функции – получение и отображение измерительной информации. Решения по управлению ОУ принимает и реализует оператор. В САУ ТП **советующего класса** реализованы информационные функции и функция советчика оператора: 1) получение и отображение измерительной информации; 2) выработка управляющих воздействий, которые предоставляются оператору как возможные варианты управления, но УВМ не приводятся в действие автоматически. Решение о реализуемых вариантах управления принимает ЛПР. В **локально-автоматических** САУ ТП автоматически выполняются функции информационные и локального управления. УВМ также формирует советы для ЛПР по выбору управляющих воздействий для вышестоящих уровней. В **автоматических** САУ все функции САУ ТП, включая управление процессом, выполняются автоматически.

1.5. Виды обеспечений компьютерных САУ

Современные САУ проектируются и осуществляются преимущественно с применением управляющих вычислительных машин (УВМ). Это специальный класс ЭВМ, который предназначен для управления реальными техническими объектами. УВМ, кроме задач измерения и контроля параметров объекта, регулирования и управления, могут решать также задачи вычислительного характера. Этот класс САУ в дальнейшем будет называться компьютерными САУ. В настоящее время УВМ известны как программируемые логические контроллеры (ПЛК) и промышленные компьютеры или управляющие компьютеры [21, 29, 30].

ПЛК, как правило, используется на нижних уровнях многоуровневой САУ, а на верхнем уровне применяются промышленные компьютеры.

ПЛК представляют собой управляющие микроЭВМ, как правило, модульного исполнения. Можно назвать следующие модули: питания, центрального процессора, памяти, ввода-вывода аналоговых сигналов, ввода-вывода дискретных сигналов, а также различные модемы для связи с внешними удаленными устройствами. В составе ПЛК могут быть и другие функциональные модули.

Промышленные компьютеры, имея сходство с персональными компьютерами по составу оборудования, отличаются от них защищенным исполнением (защита от пыли, вибрации, влаги, механических воздействий и т. д.). Промышленный компьютер позволяет подключать несколько одинаковых внешних устройств (монитор, мышь, клавиатура, накопитель на гибком диске, накопитель на жестком диске и т. д.) и снабжается целым набором устройств для организации связи с удаленными внешними устройствами или объектами. Важной составной частью промышленных компьютеров и ПЛК являются операторские пульты с графическими дисплеями, которые содержат от 8 до 60 функциональных клавиш.

В эксплуатации компьютерных САУ важное значение имеет **оперативный персонал**, к которому относятся **лица, принимающие решение** (ЛПР), и **эксплуатационный персонал** [2, 10-15]. ЛПР или операторы САУ осуществляют действия по управлению техническим объектом, а эксплуатационный персонал обеспечивает исправное функционирование САУ. Оперативный персонал, в зависимости от режима функционирования САУ, может работать как в контуре

управления, так вне контура управления. От квалификации и опыта работы оперативного персонала зависит успешная работа САУ, поэтому его подбор и подготовка имеет важное значение в эксплуатации САУ.

Компьютерные САУ для своего функционирования требуют ряд видов обеспечений [2, 10-15]:

- техническое обеспечение;
- алгоритмическое обеспечение;
- программное обеспечение;
- лингвистическое обеспечение;
- эргономическое обеспечение;
- организационное обеспечение;
- информационное обеспечение;
- методическое обеспечение.

Техническое обеспечение – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих аппаратных средств, которые также называют комплексом технических средств (КТС). В техническое обеспечение также входит документация по оборудованию, с помощью которой возможно изучение устройства и принципа действия технических средств, а также диагностика и тестирование оборудования. Современная аппаратура для САУ строится с соблюдением принципов агрегатно-модульного подхода.

Техническое обеспечение САУ включает:

- средства получения измерительной информации и ввода данных;
- средства приемо-передачи измерительной и командной информации;
- средства локального управления;
- аппаратуру центральной части САУ - средства обработки информации и принятия решений;
- средства отображения информации;
- средства использования командной информации;
- рабочие органы (средства количественного регулирования вещества и энергии);
- приборы и устройства для тестирования и наладки КТС.

Техническое обеспечение включает не только подробное описание аппаратных компонентов, но и способов их взаимодействия между собой и оперативным персоналом, а также инструкции для нормального, аварийного и отладочного режимов САУ.

Алгоритмическое обеспечение – совокупность математических моделей, математических методов и алгоритмов, необходимая для обеспечения работы САУ. Как на этапе синтеза и проектирования, так и на этапе эксплуатации функционирование САУ основано на математических моделях сигналов, процессов, объектов и управляющих устройств. Знание математических моделей позволяет разработать алгоритмы регулирования и управления, измерения и контроля, хранения и обработки информации, в том числе измерительной информации, получаемой с датчиков. Обработка информации в САУ заканчивается принятием решений, т. е. выработкой командных сигналов.

Для программирования УВМ математические методы должны быть представлены в виде алгоритмов, т. е. как заранее определенный порядок действий, который за конечное число шагов приводит к решению поставленной задачи. Алгоритмы могут быть представлены в виде математических соотношений, таблиц, схем, графиков и в словесной (вербальной) форме. Совокупность алгоритмического и программного обеспечения в некоторых случаях называют **математическим обеспечением**.

Программное обеспечение – совокупность программ, описаний и инструкций, в том числе пакетов прикладных программ (ППП), необходимая для эксплуатации САУ и обеспечивающая функционирование КТС. Программное обеспечение (ПО) включает **общее программное обеспечение**, поставляемое в комплекте с управляющим компьютером, в том числе операционные системы, системы программирования, библиотеки стандартных программ, и **специальное программное обеспечение (СПО)**.

СПО – это совокупность программ, реализующая функции конкретной САУ, составленная на основе алгоритмического обеспечения для выполнения процедур измерения, сигнализации, контроля, управления и аварийного управления на объекте автоматизации и сохранения данных. Часть СПО может поставляться в комплекте с УВМ как **стандартное СПО**, например программы приема информации от тепловых датчиков, программы ПИД регулирования, а другая часть создается в процессе проектирования.

Лингвистическое обеспечение – это совокупность языков программирования, языков проектировщиков и правила формализации этих языков, представленная в форме, удобной для применения в составе САУ. Таким образом, этот вид обеспечения используется при проектировании и эксплуатации САУ и включает описание языков,

которые используются в алгоритмическом и программном обеспечении.

Эргономическое обеспечение САУ. Это обеспечение направлено на создание безопасных и комфортных условий работы персонала при его взаимодействии с САУ. Данное обеспечение призвано решить такие вопросы, как условия работы персонала САУ (температурный режим, вентиляция, освещенность, вибрация и т. д.), так и такое внешнее оформление средств автоматизации и рабочих мест, которое создает предпосылки к повышению производительности и надежности действий персонала.

Организационное обеспечение – совокупность документов, устанавливающих организационную структуру САУ, формы и порядок прохождения рабочих документов, порядок взаимодействия должностных лиц, подразделений и отделов автоматизированного объекта.

Организационное обеспечение включает описание функциональной, технической и организационной структур системы, инструкции и регламенты для оперативного персонала САУ. Оно должно содержать совокупность правил и предписаний, обеспечивающих требуемое взаимодействие ЛПР между собой и комплексом технических средств.

Регламенты работы САУ должны содержать описание всех режимов – нормального, предаварийного и аварийного.

Информационное обеспечение – совокупность сведений, представленная на машинных носителях информации, в том числе баз данных (БД) и баз знаний (БЗ), и содержащая нормативы, справочные данные, типовые решения для задач измерения и контроля, регулирования и управления. Нормативная справочная информация содержит типовые алгоритмы измерения, обработки измерительной информации, контроля, регулирования и управления. Сюда также включаются градуировочные характеристики чувствительных элементов, измерительных преобразователей, закономерности кодирования и декодирования информации. В информационное обеспечение также входит табличные алгоритмы управления, система кодирования технологической и технико-экономической информации, описание всех сигналов и кодов, используемых для связи технических средств.

Методическое обеспечение – это совокупность документов, устанавливающая правила и инструкции по эксплуатации и диагностике САУ.

1.6. Методы проектирования САУ

Как было отмечено ранее, системы автоматизации и управления (САУ) сложными объектами, как правило, являются многоуровневыми иерархическими системами. В САУ определяющей составной частью (подсистемой) являются системы управления. Ниже рассматриваются некоторые вопросы создания систем управления.

1.6.1. Иерархическая структура управления

Процесс управления техническими объектами содержит ряд элементов, каждый из которых предназначен для выполнения определенной задачи. В обобщенной структуре процесса управления сложным объектом следует выделить несколько уровней (рис. 1.6.1).

На **первом уровне** выполняется непосредственное управление объектом по реально измеряемым координатам \vec{Y} с помощью регуляторов в цепи прямой или обратной связи. Сигнал задания при этом либо является постоянным, либо формируется на одном из более высоких уровней иерархии системы. Автоматическое управление началом и окончанием цикла работы ОУ также является задачей первого уровня.

Второй уровень включает операции контроля за ОУ. На данном уровне осуществляется измерение выходных переменных ОУ и их отображение с помощью вторичных приборов. Выход контролируемых и управляемых переменных за допустимые пределы могут сигнализироваться с помощью специальных средств. Система контроля может быть наделена функциями предсказания, что дает возможность ЛПР иметь прогнозируемое множество значений переменных во времени. Это дает возможность оперативному персоналу заранее узнавать о возможных аварийных ситуациях. По данным системы контроля принимаются меры по управлению ОУ в предаварийных и аварийных ситуациях, что может автоматически осуществляться подсистемой аварийного управления САУ.

Задачей **третьего уровня** является оптимизации управляемых процессов и организация оптимального управления ОУ. Оптимизация установившихся управляемых процессов может также называться статической оптимизацией и часто оказывается наиболее важной задачей управления объектом. Для решения задач статической оптимизации используются методы математического программирования. Оп-

тимизация динамических (переходных) режимов достигается методами теории оптимального управления, например методом динамического программирования. Для оптимизации САУ в реальном масштабе времени могут быть использованы как одноэтапные, так и поисковые численные методы.



Рисунок 1.6.1. Иерархическая структура управления: u_1, u_2 - управляющие воздействия; g_1, g_2 - задающие воздействия; y_1, y_2 управляемые выходные переменные.

На четвертом уровне решается важная задача координации работы нижестоящих подсистем иерархической САУ, так чтобы цель работы САУ была выполнена. Например, для комплекса процессов производства стального проката координация состоит во взаимном согласовании работы доменных печей, выплавки стали и прокатных

станов.

На самом высоком – **пятом уровне** решается задача организации управления сложным объектом. Здесь решаются проблемы экономического характера, подготовки кадров, сбыта готовой продукции, обеспечения комплектующими, полуфабрикатами и сырьем, обеспечения предприятия транспортом и т. п.

Разработанные к настоящему моменту методы и средства управления можно использовать на каждом из рассмотренных уровней.

1.6.2. Детерминированные системы

Любой процесс управления включает в себя следующие элементы (рис. 1.6.2):

- 1) получение информации о состоянии объекта управления путем измерения выходной переменной и определение (задание) требований к ее значениям;
- 2) обработка информации о состоянии выходной переменной и сравнение полученного результата с заданием;
- 3) принятие решений об изменении состояния объекта и выработка команды управления;
- 4) отработка исполнительным органом управляющего воздействия на объект в соответствии с принятым законом управления.

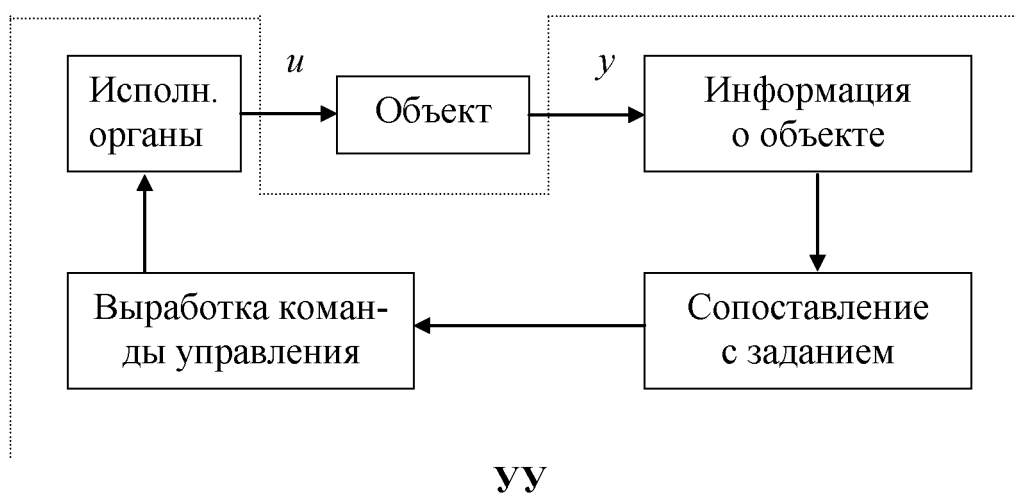


Рисунок 1.6.2. Схема процесса управления.

Все перечисленные элементы управления реализуются устройством управления (УУ). Таким образом, устройство управления

включает в себя все технические устройства кроме объекта управления.

Детерминированными следует принимать стационарные САУ, на которые оказываются детерминированные внешние воздействия. Детерминированными считаются такие внешние воздействия, которые в отличие от стохастических, имеют точное математическое описание в аналитической форме.

Системы управления делятся на системы управления с задающим сигналом и терминальные системы управления.

В системах управления с задающим сигналом система должна как можно точнее обрабатывать задающий сигнал. Если задающий сигнал постоянный, то система управления называется **системой стабилизации**, если задающий сигнал изменяется по заранее заданной закономерности, то система управления называется **системой программного управления**, а если имеет место переменный заранее неизвестный задающий сигнал, то система управления является **следящей системой**.

В терминальных системах управления конечное (желаемое) состояние объекта $\vec{x}(t)$ должно быть достигнуто за конечное время, которое может быть заранее задано или может быть произвольным.

Задача управления как в системах управления с задающим сигналом, так и в терминальных системах управления заключается в достижении цели работы системы при максимально возможной компенсации влияния внешних возмущений $z(t)$ и начальных условий $\vec{x}(0)$ при обеспечении устойчивости системы. Для выполнения поставленной задачи в систему управления, как правило, вводятся обратные связи (ОС) по выходной координате $y(t)$ или по вектору состояния $\vec{x}(t)$. С помощью ОС достигается обеспечение устойчивости всей системы даже при неустойчивом процессе. Введение обратной связи часто приводит к введению в цепи прямой связи дополнительных элементов управления.

В дальнейшем примем, что одномерная система управления характеризуется следующими переменными: задающей переменной $g(t)$, управляющей переменной $u(t)$; регулируемой (управляемой) переменной $y(t)$, вектором состояния $\vec{x}(t)$; возмущением $z(t)$.

На рис. 1.6.3 представлена структурная схема системы управления **с обратной связью или по отклонению**, в которой система должна как можно более точно обрабатывать заданный сигнал $g(t)$,

т.е. так, чтобы ошибка

$$\varepsilon(t) = g(t) - y(t) \quad (1.6.1)$$

была как можно меньше.

Принцип управления по отклонению является мощным принципом, который наиболее часто применяется при построении систем управления техническими объектами. Система управления стремится уменьшить рассогласование (1.6.1) независимо от причины его возникновения (от действия внешнего возмущения, от изменения свойств объекта или системы и т. п.).

Если регулируемой переменной является положение, скорость, ускорение, то соответствующий автоматический регулятор называют также **серворегулятором**.

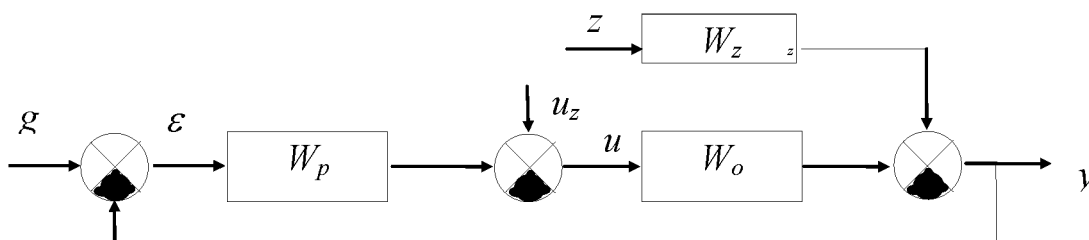


Рисунок 1.6.3. Система управления с обратной связью: $\varepsilon(t)$ – ошибка управления; $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_z(s)$ – передаточная функция объекта по каналу возмущения; $W_o(s)$ – передаточная функция объекта по каналу управления.

Если возмущение $z(t)$ может быть измерено, то можно использовать регулятор с прямой связью (рис.1.6.4), который соответствует принципу управления по возмущению. Систему управления с таким регулятором также называют системой управления по возмущению. Возмущение, действующее на ОУ, поступает одновременно и на вход автоматического регулятора. Автоматический регулятор вырабатывает такое управляющее воздействие, которое в идеальном случае полностью компенсирует нежелательное влияние возмущения.

Принцип управления по возмущению дает возможность построить инвариантную систему, т. е. такую систему управления, которая нечувствительна к возмущению $z(t)$. Инвариантная система теоретически может обеспечить абсолютно точность управления, когда ошибка (1.6.1) равна нулю. Однако абсолютную точность достичь не удастся вследствие того, что не все внешние возмущения доступны

измерению. Поэтому говорят о инвариантных системах с точностью до ε . Теория таких систем хорошо разработана [39, 40].

Во многих случаях система управления по возмущению оказывается более быстродействующей, но менее точной чем система управления по отклонению. Ухудшение точности объясняется невозможностью учета (измерения) всех действующих на объект возмущений.

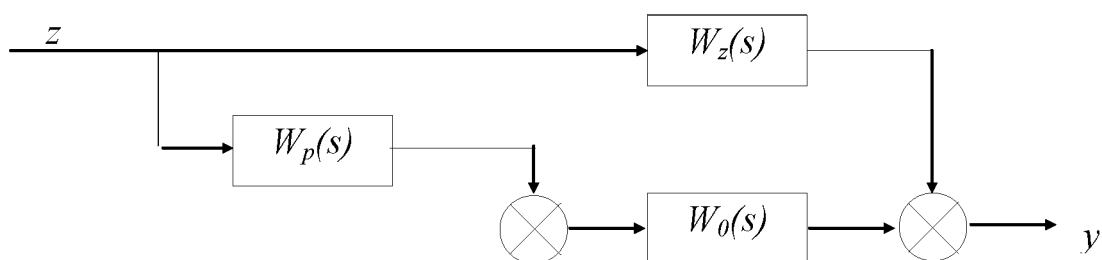


Рисунок 1.6.4. Система управления по возмущению.

Недостатки систем управления по отклонению и по возмущению устраняют применение **комбинированного принципа** управления, когда удается достичь хороших показателей как по быстродействию, так и по точности.

Для улучшения показателей качества управления иногда в систему вводят дополнительные обратные связи кроме главной, что превращает систему в многоконтурную, которую в литературе также называют **связной системой** [18-20]. Дополнительные связи возможны тогда, когда между точкой приложения управляющего сигнала и выходом объекта существуют измеряемые переменные, которые можно использовать для формирования ОС. Структурно связные системы могут быть организованы в виде **каскадных систем** с основным и дополнительным контурами управления (рис. 1.6.5). Переменная U_1 - выходная величина части объекта $W_{o1}(s)$ является вспомогательной и снова подается в систему по местной обратной связи через вспомогательный регулятор с передаточной функцией $W_{p1}(s)$. В этом случае фрагмент объекта с передаточной функцией $W_{o1}(s)$ и вспомогательный регулятор $W_{p1}(s)$ образуют дополнительный контур управления, для которого выходной сигнал основного регулятора $W_{p2}(s)$ является задающим сигналом.

Основной регулятор формирует ошибку управления в виде раз-

ности задающего сигнала g_2 и управляемой переменной y_2 . Таким образом, основной регулятор управляет внутренним контуром управления с местной обратной связью и частью объекта управления с передаточной функцией $W_{o2}(s)$. Основной и вспомогательный контуры управления, согласно рис. 1.6.5, оказываются включенными каскадно.

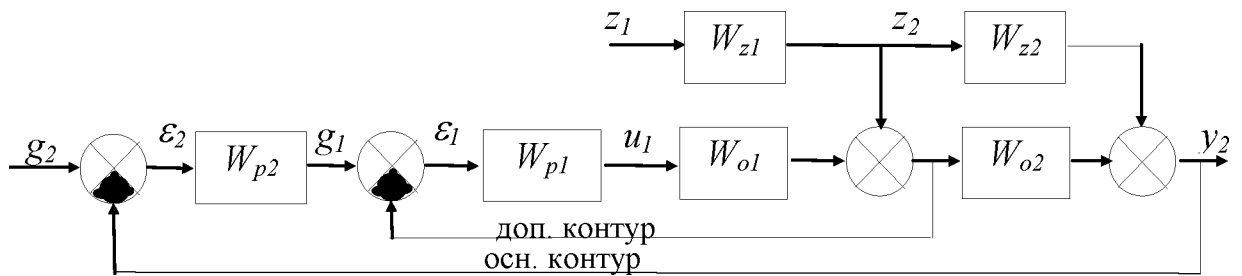


Рисунок 1.6.5. Каскадная система управления

Преимущества каскадных систем по сравнению с одноконтурными системами объясняются следующими причинами:

- поступающие на вход части объекта $W_{o1}(s)$ возмущения подвергаются предварительным изменениям дополнительным контуром управления прежде, чем они вызовут изменения управляемой переменной y_2 ;
- вспомогательная (местная) обратная связь уменьшает влияние параметров части объекта $W_{o1}(s)$ на общую динамику объекта управления, т. к. обратная связь сильно уменьшает чувствительность дополнительного контура управления, что позволяет при расчете регулятора $W_{p2}(s)$ учитывать динамику только части объекта $W_{o2}(s)$;
- сокращается время регулирования переменной y_2 , если дополнительный контур управления обеспечивает более быстрые собственные движения по сравнению с исходным.

Обратная связь (ОС) по переменным состояниям вводится (рис. 1.6.6) в случае измеримости всех переменных состояния объекта и используется, как правило, при синтезе оптимальных систем управления. ОС по переменным состояниям повышает степень устойчивости системы и изменяет характер собственных движений. Устройства

управления, действующие по измеренным значениям переменных состояния, часто называют регуляторами состояния.

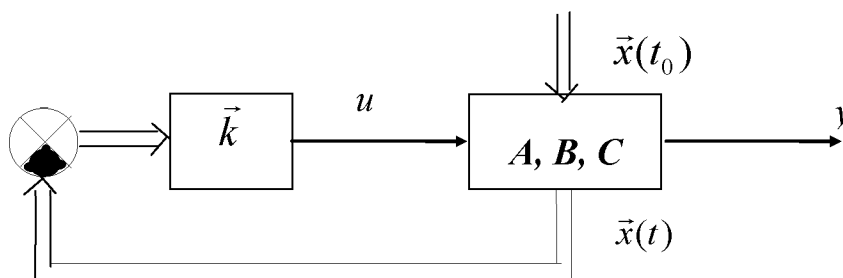


Рисунок 1.6.6. Система управления с ОС по состоянию.

Структура и параметры регуляторов состояния определяются в результате решения оптимизационной задачи с квадратичным критерием качества. С математической позиции проектирование оптимальных регуляторов состояния приводят к необходимости решения матричного уравнения Риккати.

1.6.3. Проектирование систем автоматизации и управления

При разработке аналоговых регуляторов проектировщик по техническим, технологическим и экономическим соображениям вынужден пользоваться достаточно узким набором элементов, действующих как интеграторы, дифференциаторы или пропорциональные усилители. В силу этого при синтезе аналоговых САУ приходится сталкиваться с весьма серьезными ограничениями. Суть затруднений состоит в том, что агрегатные комплексы технических средств содержат лишь компоненты линейного универсального закона управления, а также ряд нелинейностей, причем для них параметры настройки могут изменяться лишь в заранее определенном интервале. Если при синтезе параметры регулятора выходят за допустимые пределы или получается закон управления, отличный от универсального, необходимо по существу разрабатывать другой комплекс технических средств, т.к. в аналоговых системах структура технических средств определяет и структуру алгоритма управления.

Иначе обстоит дело с алгоритмами и техническим обеспечением для цифровых систем, в которых в качестве регулятора и устройства обработки информации используются управляющие вычислительные

машины (УВМ). Такие системы являются гибкими. Гибкость в техническом плане состоит в том, что для изменения технической структуры достаточно добавить новое унифицированное устройство, а ненужное отключить. Гибкость алгоритмических (программных) средств подразумевает, что для использования новых алгоритмов измерения, контроля и управления достаточно соответствующие им программы поместить в оперативную память УВМ вместо ранее используемых. Это существенно расширяет возможности реализации сложных нестандартных алгоритмов контроля и управления и создает предпосылки для практического применения новейших методов современной теории управления, но одновременно ставит перед проектировщиком вопрос, какой алгоритм наиболее эффективен при решении конкретной прикладной задачи. Ответ может быть получен в случае, если имеется достаточно полное математическое описание объекта и известны критерии сравнения алгоритмов различных типов. Критериями сравнения может быть качество управления, чувствительность к изменению параметров и воздействию помех, требуемая производительность ЭВМ и динамические свойства объекта, а также другие подобные показатели.

Несмотря на различия и особенности аналоговых и цифровых систем автоматизации и управления, процесс разработки для них алгоритмов (законов) управления содержит много общих моментов. К ним относятся следующие этапы проектирования закона управления:

1. Исследование объекта управления.
2. Разработка математических моделей.
3. Оценка состояния объекта.
4. Структурный синтез системы управления.
5. Параметрическая оптимизация алгоритмов управления.
6. Применение алгоритмов управления на объекте.

Следует отметить две ситуации, связанные с разработкой и применением цифровых САУ.

В первом случае цифровые САУ возникают в результате модернизации аналоговой системы, многие элементы которой отслужили свой срок. Реорганизации подвергается прежде всего центральная (управляющая) часть, которая заменяется на УВМ. Соответственно аналоговые математические модели системы и сигналов должны быть преобразованы в цифровую форму.

Во втором случае цифровая система возникает в результате создания новой системы из-за того, что один или несколько элементов

новой системы являются цифровыми по природе своего устройства. Все модели и сигналы должны быть представлены в цифровой форме вне всякой связи с какими-либо аналоговыми математическими моделями.

Обобщенная процедура проектирования алгоритмов САУ дана на рис. 1.6.7. Данная процедура может быть реализована также в автоматизированном или автоматическом режимах.

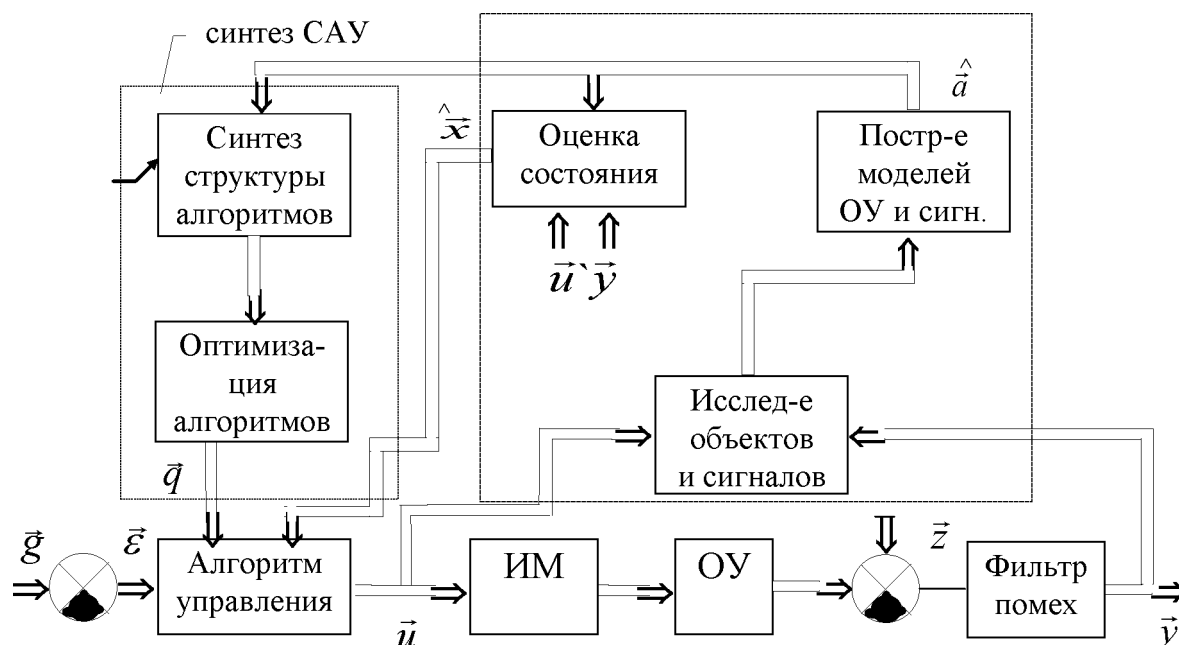


Рисунок 1.6.7. Обобщенная схема проектирования закона управления.

В процессе проектирования САУ должен быть решен ряд вопросов, которые диктуются перечисленными выше этапами разработки алгоритмов управления.

Исследование объекта управления (ОУ) выполняется с целью **получение информации** о объекте управления и сигналах, которые связаны с его функционированием. Это является отправной точкой процесса проектирования систем управления и необходима для разработки (создания) **математических моделей** объекта и сигналов.

Для построения математических моделей могут применяться теоретические методы или методы **идентификации и оценивания параметров**, т. е. математические модели могут создаваться аналитическим или экспериментальным путем. Аналитический подход предполагает разработку моделей на основе теоретических исследований с учетом априорно известных физико-химических и других закономерностей, положенных в основу функционирования объекта. Для слож-

ных объектов аналитический метод является очень трудоемким, а иногда и неприменимым. Экспериментальный метод используется при недостаточных априорных данных и основан на результатах измерений входных и выходных величин объекта. Так как результаты эксперимента всегда представляют собой таблицу, то экспериментальные методы разработки математических моделей также называют методами обработки табличных данных. Спектр возможных применений экспериментальных методов очень широк: они могут использоваться при исследовании реальных объектов, пилотных установок, физических, математических и имитационных моделей.

Таким образом, информация о объекте может быть представлена в различных формах, например:

- в виде доступных непосредственному измерению входов, выходов, переменных состояния реального объекта, пилотной установки или физической модели;
- в форме моделей ОУ и сигналов;
- в форме оценок сигналов и состояний ОУ.

Недоступные измерению переменные состояния можно восстанавливать, используя методы теории наблюдателей или оценки состояния.

Исследование объекта управления может преследовать и другие цели, например, оптимизация системы управления.

Синтез структуры системы управления. Описав математическую модель ОУ и задав соответствующий набор регулируемых и управляющих переменных, проектировщик должен определить тип системы управления. Существуют, в частности, следующие типы систем управления (СУ):

- СУ с одним входом и одним выходом;
- СУ со многими входами и со многими выходами без перекрестных связей;
- СУ со многими входами и со многими выходами с перекрестными связями.

В зависимости от особенностей типа системы управления используются различные теоретические методы синтеза структуры системы управления [16-20, 39, 40].

Параметрическая оптимизация алгоритмов управления требуется, как правило, после структурного синтеза алгоритма управления и преследует цель выбора наилучших значений параметров (коэффициентов) алгоритма, когда выполняется требования выбранного

критерия качества. Параметрическую оптимизацию также называют **параметрическим синтезом** алгоритма (системы) управления. Другая ситуация, когда необходима параметрическая оптимизация, состоит в том, существуют одинаковые с позиции теории управления объекты, т. е. объекты с одинаковыми математическими моделями (динамическими характеристиками), хотя отличаются природой, конструкцией, назначением и т. д. Для управления такими объектами, естественно, используются одни и те алгоритмы управления, но параметры алгоритма необходимо выбрать с учетом значений параметров объекта и критерия качества. Параметрическую оптимизацию систем управления **на инженерном языке** называют **настройкой систем управления** (автоматических регуляторов).

Задачи параметрической оптимизации решаются аналитически, приближенными и численными методами. Такие задачи успешно могут быть решены также методами моделирования. Существуют инженерные методы расчета параметров СУ, которые требуют выполнения достаточно сложных процедур. Но есть и такие инженерные методы, которые позволяют подстройку параметров вручную, руководствуясь несложными правилами.

В режиме *off line* расчет задач параметрической оптимизации можно автоматизировать с помощью ЭВМ.

В режиме *on line* задачи параметрической оптимизации автоматически решаются в адаптивных системах управления.

Фильтрация шумов. При проектировании алгоритма управления для сильно зашумленных объектов возникает необходимость фильтрации шумов. Фильтрация предназначена для отделения полезного, например управляющего, сигнала от шума (помехи). Объекты управления, как правило, являются низкочастотными. Это значит, что наиболее сильное воздействие на систему управления оказывают низкочастотные шумы, их действие слабеет в среднечастотном диапазоне, а высокочастотные шумы вообще не влияют на работу системы. Таким образом, низкочастотные и среднечастотные шумы должны подавляться с помощью аналоговых и цифровых фильтров.

Для фильтрации используют как чисто технические, так и комбинированные средства. К техническим средствам относятся полосовые фильтры, которые делятся соответственно на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. К комбинированным средствам можно отнести, к примеру, фильтры Винера и Калмана.

Коррекция систем управления. По различным причинам на

различных стадиях разработки и эксплуатации систем управления возникает необходимость коррекции алгоритмов управления. Алгоритмы коррекции используются как в прямых цепях передачи сигнала, так и в цепях обратной связи.

Ниже в виде обзора приводится классификация [18] основных регуляторов систем управления и методов их расчета (рис. 1.6.8).

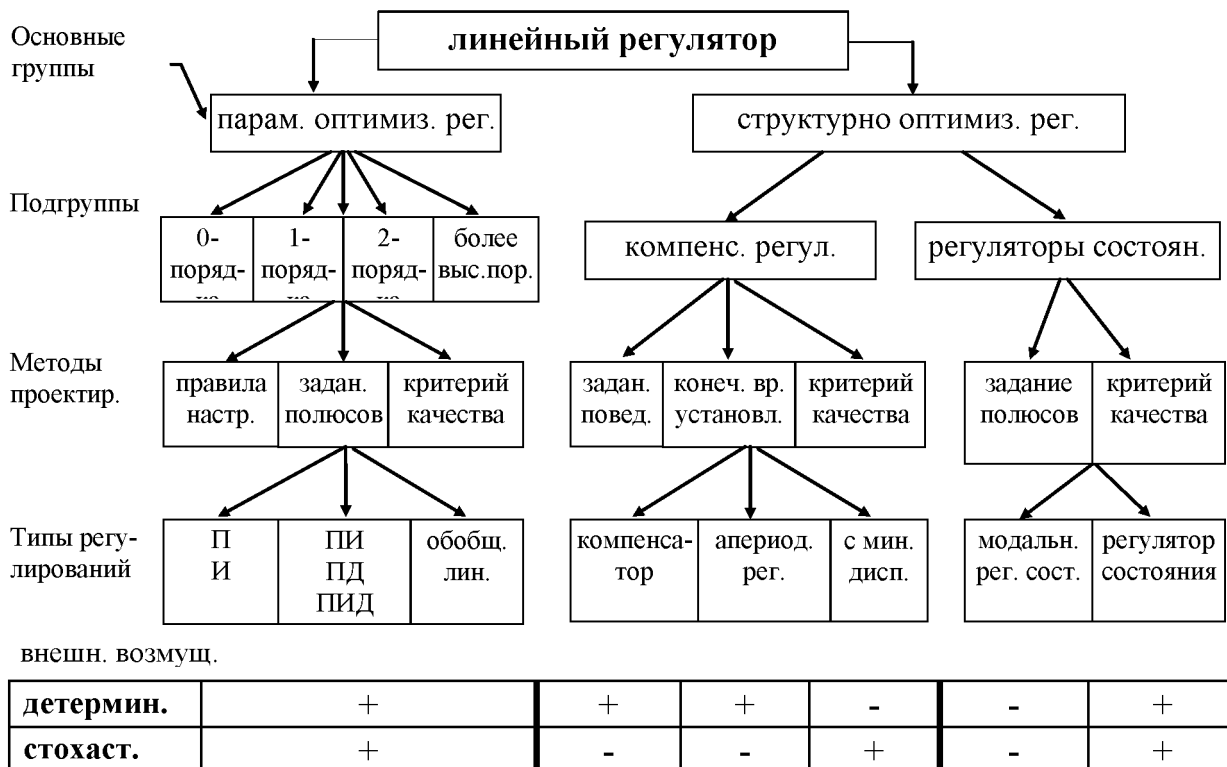


Рисунок 1.6.8. Линейные алгоритмы управления и методы их расчета.

2 ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В НЕПРЕРЫВНЫХ САУ

2.1 Математические модели сигналов и процессов

В пункте 1.2 подробно описаны этапы создания сложных САУ техническими процессами и их содержание. Перечисленные виды и объемы работ характерны в различной степени для САУ любого уровня сложности. Еще раз обратить внимание на этапы создания САУ целесообразно не только для обоснования места и роли математических моделей, но для указания на важность этого вопроса.

На обобщенном уровне эти этапы разработки следующие [1-6, 65]:

- 1) изучение объекта управления (ОУ);
- 2) синтез системы управления;
- 3) проектирование САУ;
- 4) монтаж и наладка оборудования;
- 5) эксплуатация автоматизированного объекта.

Изучение объекта управления является этапом перехода от реального объекта к его формализованному представлению. На этом этапе объект автоматизации подвергается исследованию с целью изучения оборудования ОУ и процессов, протекающих в них. После этого ОУ подвергается системному анализу, в ходе которого определяются существенные переменные из групп: 1) контролируемых и управляемых переменных; 2) контролируемых, но неуправляемых переменных; 3) неконтролируемых и неуправляемых переменных; 4) выходных переменных (показателей). Этап заканчивается получением: 1) описания ОУ; 2) математических моделей (ММ) ОУ в классической форме или в пространстве состояний; 3) формализованной постановки задачи автоматизации объекта.

Описание ОУ содержит краткие сведения о назначении, основных характеристиках, технических средствах (оборудовании) и о закономерностях процессов, на которых основано действие объекта. Анализ оборудования и процессов объекта позволяет представить его условно в виде блок-схемы с указанием входящих и выходящих сигналов, что в дальнейшем служит базой для получения ММ ОУ. Описание ОУ содержит постановку задачи автоматизации на вербальном и предметно-ориентированном языках, т. е. на языке технолога производственного процесса.

Математические модели объекта управления (ММ ОУ) включа-

ют в себя модели процессов и сигналов и могут быть получены либо аналитическими способами, либо экспериментальными методами.

Формализованная (абстрагированная) постановка задачи автоматизации объекта должна содержать четкую формулировку задач автоматизации на математическом языке с использованием математических моделей объекта и сигналов, цели работы объекта и критериев оценки работы объекта.

Синтез системы управления есть задача отыскания требуемого алгоритма управления, при которой достигается цель управления при одновременном выполнении требований к системе. Этап синтеза является полностью формализованным, т. к. все процедуры синтеза ведутся только на математическом языке с использованием методов теории автоматического управления. Этот этап возможно автоматизировать с применением аналоговых вычислительных машин (АВМ) или цифровых вычислительных машин (ЭВМ). Теория линейных стационарных систем управления развита достаточно хорошо. Теория других, более сложных классов систем управления, находится в состоянии развития. При синтезе системы управления является важным обеспечить не только устойчивость процессов в системе, но требуемые показатели качества. Для проверки результатов синтеза выполняется анализ системы управления. Для этой же цели можно использовать методы математического, имитационного и физического моделирования. Математическое и имитационное моделирование выполняется преимущественно с помощью ЭВМ, а для физического моделирования используются лабораторные или пилотные установки.

Проектирование САУ следует рассматривать как этап перехода от теоретических результатов, полученных при синтезе, к физической реализации системы управления с применением реального аппаратного базиса и является в определенном смысле обратным этапу изучения объекта управления. На этапе проектирования выполняется схемотехнический синтез САУ, обоснование и выбор технических компонентов, согласование элементов и узлов для совместной работы, размещение и компоновка элементов, решаются вопросы энергообеспечения и безопасности жизнедеятельности и ряд других вопросов, которые позволяют приступить к монтажу и наладке САУ [1-24].

Монтаж и наладка оборудования выполняется по окончании проектирования. Монтаж – это установка и соединение оборудования с другими компонентами системы. Наладка подразумевает процедуры тестирования и пробных пусков, которые позволяют добиться правильного функционирования каждой составляющей САУ и САУ в це-

лом.

Эксплуатация автоматизированного объекта осуществляется с помощью персонала и документации, подготовленных в ходе проектирования САУ. В процессе эксплуатации поддерживаются расчетные характеристики САУ.

Математические модели играют важную роль при создании и эксплуатации САУ. Существует обширная классификация математических моделей [39, 40]. Рассмотрим некоторые классы математических моделей по наиболее известным признакам классификации.

По наличию случайного механизма: 1) детерминированные и стохастические; **по виду модели:** 1) линейные и нелинейные; **по свойствам объекта:** 1) статические и динамические; **по характеру протекаемых в системе процессов:** 1) непрерывные и дискретные; **по объему требуемой априорной информации:** 1) аналитические (теоретические) и экспериментально-статистические.

Класс **детерминированных** моделей используется для математического описания объектов и систем с детерминированными параметрами, которые не подвержены случайным внешним воздействиям. Детерминированность параметров обозначает отсутствие случайных изменений параметров в процессе работы системы и проявляется в виде постоянства коэффициентов математической модели (ММ). Детерминированные модели, если заданы начальные условия и предистория процесса позволяет находить однозначное соответствие функций, (математических операторов) своим аргументам. Детерминированные динамические системы представляются с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. В неявной форме дифференциальное уравнение задается в виде

$$F(\vec{u}, \vec{u}^{(i)}, i = 1, m; \vec{y}, \vec{y}^{(i)}, i = 1, n, t) = 0.$$

Детерминированные ММ находят широкое применение, хотя случайные факторы почти всегда сопровождают работу объектов и систем. Однако в большинстве случаев последствиями их действия удается пренебрегать.

Стремление учесть влияние случайных воздействий приводят к **стохастическим (вероятностным)** математическим моделям. Вероятностные ММ характеризуются тем, что входные и выходные переменные являются случайными функциями и модель описывает не связи между входными и выходными величинами, а между их случайными характеристиками. К широко используемым случайным характеристикам случайных функций относятся среднее по множеству

(математическое ожидание), среднее по времени, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, среднеквадратическое значение, корреляционные функции и спектральные плотности. Математические модели с применением перечисленных статистических характеристик рассматриваются в корреляционной теории систем управления [39-43].

Статические модели характеризуют установившееся состояние систем управления, когда переходный процесс закончен и выходная переменная есть реакция системы на поступающее входное воздействие. Переходный режим работы системы представляется с помощью **динамических** моделей. Статические модели записываются с помощью алгебраических уравнений, а динамические – дифференциальных уравнений.

2.2 Первичная обработка измерительной информации

Различают следующие действия с информацией: 1) добывание; 2) преобразование; 3) прием и передача; 4) хранение; 5) обработка; 6) принятие решения.

В системах автоматизации и управления информация о контролируемых и измеряемых величинах добывается с помощью датчиков, поэтому ее называют измерительной. Измерительная информация в свою очередь передается от одного устройства САУ к другому в виде сообщений, которые должны быть представлены с помощью сигналов, чаще всего электрических. Сигналы электрической природы являются наиболее удобными для хранения, воспроизведения, обработки и передачи по линии связи как на короткие, так и дальние расстояния.

Измерительная информация от датчика до того, как поступает в центральную часть САУ, подвергается предварительной (первичной) обработке. Наиболее часто используемыми видами первичного преобразования являются кодирование, масштабирование, линеаризация, сглаживание и фильтрация.

Кодирование – универсальный способ отображения информации при ее хранении, передаче и обработке в виде системы соответствий между элементами сообщений и сигналами, при помощи которых эти элементы можно зафиксировать:

$$k = (a_{n-1}, \dots, a_1, a_0), \quad (2.2.1)$$

где k - кодовое слово, a_i - элемент кода.

Декодирование – обратная операция, представляющая процесс преобразования кода (сигнала) в сообщение (сигнал).

Кодирование применяется для достижения двух основных целей: 1) обеспечение достоверности информации при передаче на расстояние, 2) защиты информации от несанкционированного доступа.

Примером кодирования может служить представление информации с помощью набора алфавитных букв, цифр, специальных символов. Аналогово-цифровое и цифро-аналоговое преобразования также можно рассматривать как примеры кодирования и декодирования информации.

Аналогово-цифровое преобразование используется для получения из аналогового сигнала дискретный сигнал. Устройство для выполнения аналогово-цифрового преобразования называется АЦП - **аналогово-цифровой преобразователь** (шифратор). Закономерность работы задается формулой

$$N(t_i) = \frac{A(t_i)}{\Delta A} \pm |\delta N(t_i)|, \quad (2.2.2)$$

где $A(t_i)$ – аналоговая величина, $N(t_i)$ – цифровая величина, ΔA – шаг квантования по уровню (аналог эквивалента единицы младшего разряда кода); $\delta N(t_i)$ - абсолютная погрешность преобразования, которая не превышает половину шага квантования по уровню:

$$0 \leq \delta N(t_i) \leq \frac{\Delta A}{2}.$$

В цифровой системе имеется также дешифратор - он преобразует цифровую информацию, поступающую от цифрового регулятора, в выходной аналоговый сигнал, т.е. выполняет цифро-аналоговое преобразование. Такое устройство соответственно называется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Количественная связь между его входной числовой величиной $N(t_i)$ и ее аналоговым эквивалентом $A(t_i)$, характеризующая алгоритм преобразования, имеет вид

$$A(t_i) = N_i \Delta A \pm \delta N(t_i) \quad (2.2.3)$$

где ΔA - шаг квантования по уровню (аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода); $\delta N(t_i)$ - погрешность преобразования.

Пример использования АЦП и ЦАП в САУ дан на рис. 2.2.1., где ЦР – цифровой регулятор.

Линеаризация. Существуют линейные и нелинейные зависимости между выходными и входными величинами объектов. Обработка

линейной функции проще чем обработка нелинейной функции, поэтому когда это возможно нелинейная зависимость подвергают линеаризации. Таким образом, линеаризация есть способ представления нелинейной функции с помощью линейной функции. Линеаризация позволяет упростить математическую модель объекта или сигнала, но основным условием допустимости линеаризации является адекватность линеаризованной модели исходной нелинейной модели. Когда линеаризация недопустима на всем диапазоне действия объекта, используют кусочно-линейную линеаризацию. Линеаризацию можно выполнить аналитическим, табличным и графическими способами.

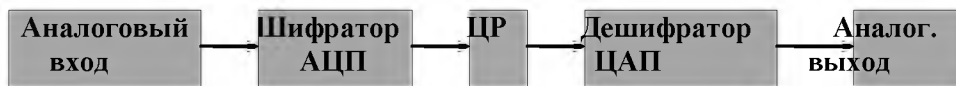


Рисунок 2.2.1.

Сглаживание в общем случае обозначает усреднение значений функции (переменной) по имеющимся нескольким значениям за один и тот же момент времени. С математической позиции решение задачи сглаживания приводит к минимизации суммы квадратов невязок, т.е. к методу наименьших квадратов (МНК).

Фильтрация. При построении САУ и их подсистем возникает задача разделения полезного сигнала и помехи. Как правило, предполагается, что измеряемый сигнал $y(t)$ представляет собой аддитивную смесь истинного сигнала $v(t)$ и помехи $e(t)$:

$$y(t) = v(t) + e(t) \quad (2.2.4).$$

При выделении полезного сигнала из зашумленной величины $y(t)$ встречаются две ситуации:

- 1) частотный спектр сигнала и шума лежат в разных не пересекающихся частотных диапазонах;
- 2) частотные спектры сигнала и шума накладываются друг на друга.

В первом случае разделение сигналов может быть выполнено применением полосовых фильтров (рис.2.2.2).

Во втором случае для выделения истинного сигнала используются статистические методы оценивания. В этих условиях принципиально невозможно получить абсолютно точные значения сигналов и целью является лишь минимизация воздействия помех.

Первым фильтром полосового типа стал предложенный в 1940 г. Фильтр Винера для непрерывных сигналов, в основу которого был положен МНК. Реализация этого фильтра столкнулась с существенными трудностями. Наиболее часто используются фильтры Колмогорова – Винера и Винер – Хопфа.

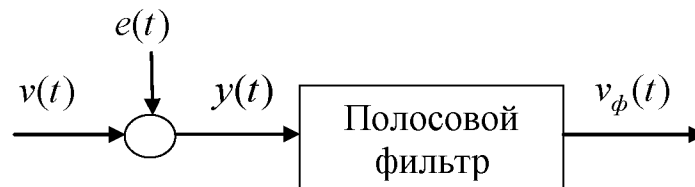


Рисунок 2.2.2 $v_\phi(t)$ -отфильтрованный сигнал.

Новым этапом в теории фильтрации стал фильтр Калмана, предложенный в 1960 г. Достоинством являлся применение параметрической модели сигнала, тогда как фильтр Винера использовал непараметрическую модель сигнала.

Первоначально Ф. Калмана был разработан для дискретных сигналов, представленных моделями в пространстве состояний. С помощью МНК производится оценка состояния модели $\hat{x}[k]$, которое потом используется для вычисления $v_\phi(t)$.

Фильтрация сигналов выполняется аппаратным или аппаратно-программным способом.

Масштабирование – прием, используемый для линейного преобразования функций для удобства и наглядности представления или для удобства математической обработки. При этом числовая ось u отображается на числовую ось y :

$$y = ku, \quad (2.2.5)$$

где $k = (y^+ - y^-) / (u^+ - u^-)$; $y \in [y^-, y^+]$; $u \in [u^-, u^+]$.

При масштабировании с центрированием и нормированием прямоугольная координатная система отображается в другую прямоугольную координатную систему следующим образом.

Перенос начала координат:

$$y_0 = (u^+ + u^-) / 2; \quad \Delta u = (u^+ - u^-) / 2, \quad (2.2.6)$$

$$y = (u - y_0) / \Delta u. \quad (2.2.7)$$

Здесь u - абсцисса исходной системы; y - абсцисса новой системы. То же самое выполняется для других координатных осей.

2.3. Алгоритмы принятия решений

Любая САУ может рассматриваться с информационной позиции, когда она представляется как система сбора, хранения, преобразования, обработки информации и принятия решения. В системах управления принятия решения подразумевает расчет и выдачу управляющего воздействия (команды управления) на управляемый объект. Непрерывные или аналоговые системы обладают ограниченными возможностями хранения информации. Управляющее воздействие вырабатывается аналоговым регулятором на основе выбранного алгоритма управления. Рассмотрим проблему синтеза алгоритма управления в идеальной системе управления.

Расчет идеальных систем управления. В общем случае управление некоторым объектом состоит в целенаправленном изменении или сохранении его состояния. Для управления к объекту подключается устройство управления, которое формирует команду управления для достижения поставленной цели. Совокупность объекта управления (ОУ) и устройства управления (УУ) образует систему управления (СУ).

Если объект является **детерминированным**, т.е. его состояние полностью определяется поступающими на его входы контролируемые воздействиями и функционирует при отсутствии возмущающих воздействий от внешней среды, то структура имеет указанный на рис. 2.3.1 вид.

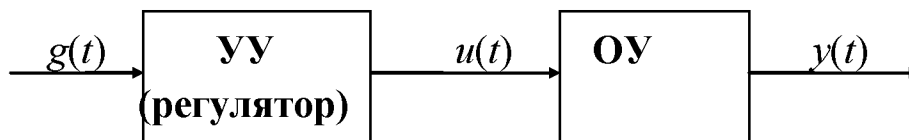


Рисунок 2.3.1.

Здесь $y(t)$ - выходная величина, $g(t)$ - входная величина, которая определяет желаемое значение $y(t)$; $u(t)$ - управляющее воздействие.

УУ можно рассматривать как вычислительное устройство, функционирующее в соответствии с некоторым алгоритмом, вид которого зависит от цели управления, свойств ОУ и ограничений. В наиболее простом случае, когда ОУ является линейным, а целью управления является поддержание равенства $y(t) = g(t)$ при отсутствии ограничений на переменную $u(t)$ и ее производные, алгоритм функционирования регулятора также должен быть линейным.

Алгоритм УУ может быть записан в виде передаточной функции $W_p(s)$, конкретный вид которого может быть найден из выражения:

$$y(t) = W_p(p)W_o(p)g(t), \quad (2.3.1)$$

где $W_p(p)$ - операторная передаточная функция УУ; $W_o(p)$ - операторная передаточная функция ОУ по каналу регулирования.

Подставив (2.3.1) в целевую функцию управления $y(t) = g(t)$, можно найти выражение для передаточной функции УУ:

$$W_p(s) = \frac{1}{W_o(s)}, \quad (2.3.2)$$

т.е. желаемый оператор УУ выбирается в виде обратного оператора ОУ.

Передаточная функция $W_p(s)$ в виде (2.3.2) может быть реализована сравнительно редко в силу как технических, так и принципиально непреодолимых трудностей, которые даны ниже:

1. При наличии в объекте транспортного запаздывания в преобразовании воздействия $g(t)$ на $y(t)$ оператор (2.3.2) будет определять физически нереализуемое устройство, способное осуществлять точный прогноз изменения сигнала $g(t)$ на время запаздывания даже тогда, когда $g(t)$ является случайным процессом.

2. Стремление к возможно более точной реализации обратного оператора обычно приводит к необходимости многократного дифференцирования сигнала $g(t)$, что может привести к недопустимому возрастанию влияния случайных помех и к недопустимо большим изменениям как самого управляющего сигнала $u(t)$, так и его производных.

В силу указанных причин точная реализация алгоритма управления (2.3.2) невозможна. Вместо этого ставится задача синтеза оптимального алгоритма УУ, когда допустима ошибка управления

$$\varepsilon(t) = g(t) - y(t), \quad (2.3.3)$$

минимально возможная при принятых ограничениях.

Расчет реальных систем управления. Рассмотренная выше разомкнутая структура обычно оказывается непригодной для управления ОУ [31, 32, 40], т. к. к перечисленным уже причинам можно добавить следующие:

1) в объекте могут существовать источники внутренних неконтролируемых случайных возмущений;

2) практически невозможно контролировать все возмущающие воздействие внешней среды;

3) математические модели объекта всегда известны лишь с некоторой степенью приближения, поэтому найденные на их основе математические модели регулятора являются не оптимальными.

Указанные выше причины вынуждают рассматривать ОУ как вероятностный объект и постоянно контролировать его фактическое состояния для корректировки управляющего воздействия.

В общем случае УУ необходимо обеспечивать следующей информацией:

- 1) о желаемом состоянии объекта [сигнал $g(t)$];
- 2) о внешних воздействиях $f(t)$;
- 3) о фактическом состоянии объекта [сигнал $y(t)$].

Соответствующая функциональная структура системы управления дана на рис. 2.3.2.

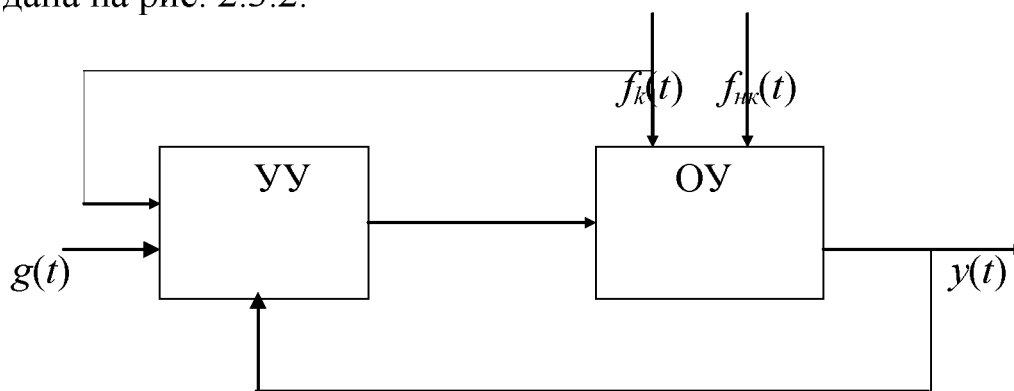


Рисунок 2.3.2. $f_k(t)$ - контролируемые внешние воздействия, $f_{нк}(t)$ - неконтролируемые внешние воздействия.

Таким образом, система управления стала теперь замкнутой, в которой задача синтеза алгоритма управления существенно усложняется, в частности из-за того, что появляется возможность возникновения неустойчивых режимов, связанных с генерацией системой расходящихся колебаний при отсутствии заметных внешних причин.

Типовые алгоритмы управления. Широкое распространение получили линейные законы регулирования, которые получаются из уравнения общего вида:

$$u(t) = k_p + \frac{1}{T_u} \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

где $u(t)$ - управляющая переменная, $\varepsilon(t)$ - отклонение регулируемой переменной от заданного значения, k_p - коэффициент передачи, T_u -

постоянная интегрирования, T_δ - постоянная дифференцирования. Величины k_p , T_u , T_δ также называются параметрами настройки алгоритма управления (регулятора). Вышеприведенное уравнение задает ПИД (пропорционально-интегро-дифференцирующий) алгоритм управления. Структурно ПИД закон управления соответствует параллельно-согласному соединению пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего звеньев. Исключив из соединения одно или два звена можно также получить П (пропорциональный), И (интегрирующий), Д (дифференцирующий), ПИ (пропорционально-интегрирующий), ПД (пропорционально-дифференцирующий)- законы управления. ПИД закон управления также известен как линейный универсальный закон управления, а соответствующий ему автоматический регулятор называется линейным универсальным регулятором. Д и ПД законы управления, как правило, не используются.

2.4 Параметрический синтез систем управления

2.4.1 Параметрическая оптимизация детерминированных систем управления при детерминированных воздействиях

Если в процессе нормального функционирования системы управляющая величина $u(t)$ и его производные не выходят за пределы дозволённых границ, система может считаться линейной. При этом ошибка управления может быть найдена из условия

$$\varepsilon(t) = W_{eg}(p)g(t), \quad (2.4.1)$$

где $W_{eg}(p) = 1 - W_p(p)W_u(p)$.

Поскольку ошибка принимает различные значения в различные моменты времени, для определения ее численного значения за все время процесса управления необходимо вводить некоторый подходящий функционал от $\varepsilon(t)$. Выбор этого функционала зависит от особенностей работы конкретной системы, в частности, от того, является ли **сигнал** $g(t)$ детерминированным или случайным.

Если $g(t)$ - детерминированный сигнал (т.е. полностью известный), который появляется в момент t_0 , принимаемый за начало отсчета ($u(t) = 0$ при $t < t_0$ или $t < 0$), функционал выбирается в виде:

$$I_\varepsilon = \int_{t_0}^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \quad (2.4.2)$$

Приведем поясняющие выкладки. Передаточная функция по ошибке определяется из условия

$$W_{\text{ог}}(s) = \frac{E(s)}{G(s)}.$$

Лапласово изображение ошибки $\varepsilon(t)$: $E(s) = G(s) - Y(s)$, где $Y(s) = G(s)W_p(s)W_u(s)$. Подставляя, получаем, что $E(s) = G(s)[1 - W_p(s) * W_u(s)]$, то есть

$$\frac{E(s)}{G(s)} = 1 - W_p(s) * W_u(s).$$

$$W_{\text{ог}}(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{G(s) - Y(s)}{G(s)} = 1 - W_p(s) * W_u(s).$$

Цель управления состоит в минимизации интегрального квадратического критерия качества (ИКК) (2.4.2). Вычисление ИКК может быть осуществлено на основании выражения:

$$I_\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\text{ог}}(j\omega)|^2 |G(j\omega)|^2 d\omega, \quad (2.4.3)$$

где $|W_{\text{ог}}(j\omega)|$ - модуль КЧХ системы по ошибке; $|G(j\omega)|$ - модуль спектра (Фурье-преобразования) от $g(t)$.

В частности, когда $g(t) = g * I(t)$, т.е. ступенчатая функция, функционал (4.2.3) принимает вид:

$$I_\varepsilon = \frac{g_0^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\text{ог}}(j\omega)|^2 \frac{1}{\omega^2} d\omega \quad (2.4.4)$$

Проектирования оптимального алгоритма управления $W_p^u(s)$ может быть осуществлено в следующей последовательности.

1. Согласно (2.3.2) находят идеальный оператор $W_p^u(s)$, который бы позволил осуществлять точное управление.
2. С учетом $W_p^u(s)$ подбирается подходящее выражение для реального оператора $W_p(s)$.
3. Путем минимизации функционала (2.4.2) находятся параметры (коэффициенты) реального оператора $W_p(s)$:

$$I_\varepsilon^* = \min_{K_p, T_i} I_\varepsilon.$$

Минимизация функционала (2.4.2) проводится методами оптимизации. При этом может понадобиться проверка нахождения $u(t)$ в зоне линейности. Для ограничения возможного значения $u(t)$ и его производных в некоторых случаях $u(t)$ и его производные вводятся в подынтегральное выражения критерия (2.4.2) [31, 32].

2.4.2 Параметрическая оптимизация детерминированных систем управления при случайных воздействиях

Если задающее воздействие $g(t)$ является недетерминированной (т.е. случайной функцией времени), то возможны два вида критериев оптимального управления: статистические и минимаксные [31, 32, 39, 40].

В качестве статистического критерия чаще всего используется среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_ε управляемой величины $y(t)$ от задающей $g(t)$:

$$\sigma_\varepsilon = +\sqrt{\sigma_\varepsilon^2},$$

где σ_ε^2 - дисперсия ошибки управления.

Дисперсия случайного стационарного процесса оценивается по центрированной реализации процесса $\varepsilon(t)$ в интервале времени T . АКФ по времени

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{\varepsilon}^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [\varepsilon(t) - m_\varepsilon]^2 dt \quad (2.4.5)$$

где m_ε - математическое ожидание (среднее по времени) ошибки $\varepsilon(t)$. Оценка (2.4.5) тем точнее в вероятностном смысле, чем больше T .

Вычисление дисперсии ошибки управления в СУ, приведенной на рис. 2.3.2, производится по выражению аналогичной (2.4.3):

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\text{вг}}(j\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega \quad (2.4.6)$$

где $S_g(\omega)$ - спектральная плотность случайного процесса $G(t)$.

Спектр мощности $S_g(\omega)$ стационарного случайного процесса представляет собой Фурье-изображение корреляционной функции (по времени) $r(\tau)$:

$$S_g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_g(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2.4.7)$$

а оценка корреляционной функции $R_g(\tau)$ может быть найдена по центрированной реализации процесса длительности T :

$$\hat{R}_g = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} g(t)g(t+\tau) d\tau \quad (2.4.8)$$

Выбор оператора УУ $W_p(s)$ и определение оптимальных параметров его настройки, минимизирующий СКО σ_ε управления, может осуществляться в том же порядке, что и при минимизации интегрального

квадратичного критерия. СКО ошибки управления σ_ε определяет значение отклонения в среднем на достаточно большом интервале времени; при этом не исключается возможность кратковременного выброса случайного процесса $\varepsilon(t)$ за пределы среднего значения. Подобные выбросы случайного процесса $\varepsilon(t)$ могут представлять опасность для управляемого объекта, и тогда оператор $W_p(s)$ выбирается из условия минимизации максимально возможных значений выбросов.

Если для случайной величины нормального закона распределения справедливо правило, 3σ когда вероятность того, что значение случайной величины не выйдет за пределы 3σ составляет $P=0,9974$, т.е. величину, близкую к единице, то подобные утверждение нельзя выдвинут относительно случайного процесса. Случайный процесс можно рассматривать как последовательность случайной величины. В общем случае между произвольной парой значений случайного процесса (сечений) существует статистическая взаимосвязь. Однако если сечения разделены интервалом времени, превышающим интервал корреляции (интервал, за которым корреляционная функция процесса не отличается от нуля), эти сечения становится независимыми случайными процессами.

Вероятность наступления сложного события, состоящего в совместном появлении нескольких независимых событий. Таким образом, вероятность того, что ни одно из сечений (СВ) не выйдет за заданные пределы равна p^n , где P - вероятность невыхода за заданные пределы одного события, n - число событий (сечений). Реальная продолжительность работы ТООУ имеет значения порядка тысяч и более интервалов корреляции протекающих в них процессов.

Так, если $p(\varepsilon < 3\sigma_\varepsilon) = 0.9973$, то при $n=2000$ $p^n \{ \varepsilon(t) < 3\sigma_\varepsilon \} = 0.0054$.

Т. е. практически невероятным событием является отсутствие выброса хотя бы в каком-нибудь сечении реализации случайного процесса за заданный уровень. Причина, почему это не наблюдается состоит в том, что реальные случайные процессы часто отличаются от нормального распределения, особенно в области средних и высоких частот. Сказанное резко усложняет синтез систем управления на основе методов теории вероятностей и математической статистики, т.к. требует реального закона распределения для каждого конкретного случая. Решением проблемы может быть переход от статистических к минимаксным критериям.

Существо минимаксных критериев состоит в том, что оценка

качества работы системы осуществляется для экспериментальных (наиболее тяжелых) ситуаций, когда отклонение достигает наибольших (возможных) значений. Возмущения по-прежнему предполагаются случайными процессами, реализации которых в процессе функционирования могут принимать самую разнообразную форму. Задача состоит в том, чтобы среди всех возможных реализаций случайного процесса найти наиболее тяжелую и опасную для системы управления. Синтез системы управления производится для этой формы реализации случайного процесса, которая уже может быть описана детерминированной функцией времени.

Для линейных систем наиболее опасной реализацией случайного процесса является ограниченный по модулю ступенчатый сигнал (амплитуда возмущения находится методами теории накопления возмущений). Основной практический вывод из этой теории: для линейных неколебательных систем наиболее опасным является ступенчатое возмущение максимально возможной амплитуды.

Так как обычно требуется, чтобы выброс был не только малым по амплитуде, но и по возможности кратковременным, в качестве критерия оптимальности по-прежнему может быть выбран интегральный квадратичный критерий, при непреломном условии, что расчетным задающим воздействием $g(t)$ должно быть ступенчатый сигнал.

Управление реальными ТОО характеризуется тем, что, они как правило функционируют в условиях непредвиденного изменения состояния внешней среды. Проявляется это в виде действия на объект случайных возмущений по каналам с различными динамическими свойствами. С учетом этого изменение управляемой величины находится из условия:

$$y(t) = W_u(p)u(t) + \sum_{i=1}^m W_{e_i}(p)e_i(t), \quad (2.4.9)$$

где $W_u(p)$ - операторная передаточная функция ОУ; $u(t)$ - управляющее воздействие; $W_{e_i}(p)$ - операторная передаточная функция ОУ по каналу действия возмущения $e_i(t)$; m - число возмущений.

УУ должно непрерывно получать информацию обо всех возмущениях для соответствующей коррекции управляющего воздействия (рис. 2.4.1). Для рассматриваемой системы справедливо:

$$y_e(t) = W_e(p)e(t) - W_{ke}(p) * W_u(p) * e(t), \quad (2.4.10)$$

где $W_e(p)$ - операторная передаточная функция ОУ по каналу возмущения; $W_{ke}(p)$ - операторная передаточная функция УУ, осуществляющего компенсацию возмущения $e(t)$.

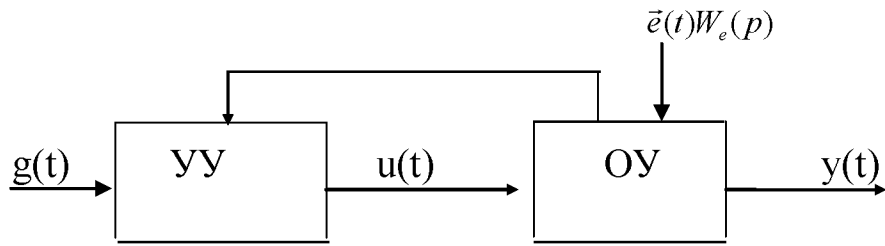


Рисунок 2.4.1.

Уравнению (2.4.10) соответствует структурная схема (рис. 2.4.2), которая учитывает одно единственное возмущение $e(t)$.

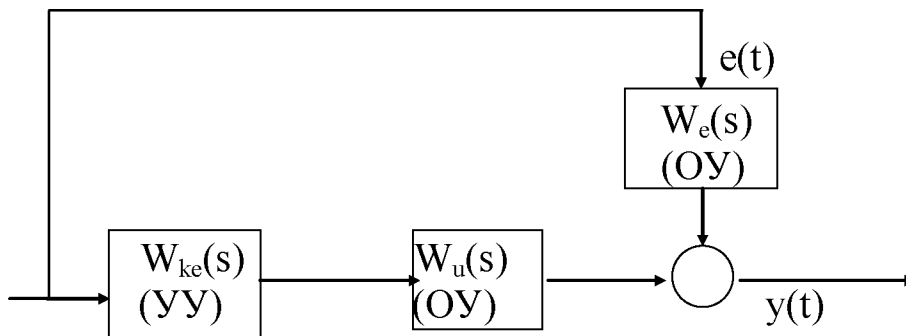


Рисунок 2.4.2.

Очевидно, что для отсутствия отклонения $y(t)$ при действии необходимо соблюдение равенства $W_{ke}(s) * W_u(s) = W_e(s)$, откуда

$$W_{ke}(s) = W_e(s) / W_u(s). \quad (2.4.11)$$

Это есть условие инвариантности СУ к внешнему воздействию. Реализация передаточной функции (2.4.11) встречает те же затруднения, что и для функции (2.3.2). Переход к реализуемому алгоритму управления осуществляется в порядке, описанном пункте 2.3.

Дисперсия ошибки управления в СУ (см. рис. 2.4.2)

$$\sigma^2 y = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{ye}(j\omega)|^2 S_e(\omega) d\omega, \quad (2.4.12)$$

где $S_e(\omega)$ - спектр мощности (спектральная плотность) сигнала $e(t)$.

Величина минимаксного ИКК вычисляется по формуле, аналогичной (2.4.4):

$$I_Q = \frac{e_0^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{ye}(j\omega)|^2 \frac{1}{\omega^2} d\omega, \quad (2.4.13)$$

где e_0 - максимальное значение ступенчатого возмущения $e(t)$.

2.5. Системы высокого качества

Оптимальная с позиции принятого критерия система - это не всегда технологически работоспособная система. Чтобы система могла успешно функционировать, необходимо, чтобы (минимальная) ошибка регулирования, реализуемая системой, фактически была не больше некоторого наперед заданного значения.

Если ошибка оценивается ее средним квадратическим отклонением

$$\delta_{\varepsilon}(t) = \sqrt{M[E^2(t)]},$$

то максимальная ошибка оптимальной системы должна удовлетворять неравенству.

$$\varepsilon_{ck} \leq \varepsilon_g \quad (2.5.1)$$

где ε_g - допустимое значение ошибки.

Если условие не удовлетворяется, необходимо перейти к более сложному алгоритму регулирования, либо к более сложной информационной схеме системы.

Допустимое значение ошибки удобно выражать в **единицах некоторого постоянного его значения**, независящего от структуры системы регулирования и ее алгоритмов.

Рассмотрим систему, заданную структурой (рис. 2.5.1).

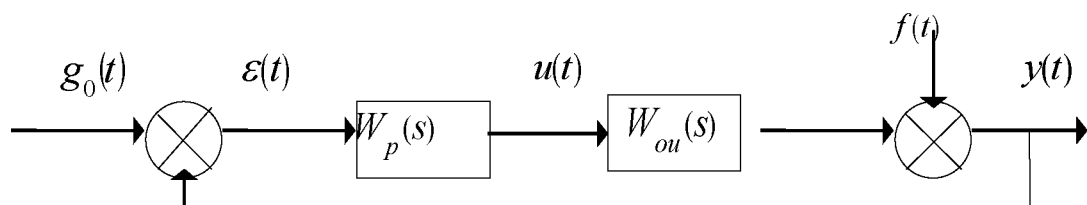


Рисунок 2.5.1.

Здесь приняты следующие обозначения:

$W_p(s)$ - передаточная функция регулятора; $W_{ou}(s)$ - передаточная функция объекта по каналу регулирования; $f(t)$ - эквивалентное возмущение, адекватно приложенное к выходу объекта.

Предположим, что в рассматриваемой системе отсутствует всякое управление (в том числе и ручное). Легко заметить, что в этом случае отклонение (рассогласование) совпадает с эквивалентным возмущением $f(t)$,

т.е.
$$\sigma = \sigma_{\varepsilon} = \sqrt{M[F(t)]^2}.$$

Теперь условие (4.6.1) можно переписать так:

$$\sigma_g \leq \delta \sigma_{ef}, \quad (2.5.2)$$

где $\sigma_g = \delta \sigma_{ef}$ - допустимое значение среднеквадратической ошибки, $\delta > 0$ - заранее заданная малая величина.

Условие (2.5.2) принято называть **условием технологической работоспособности системы**. σ_{ef} в (2.5.2) - это СКО регулируемой величины, которое возникло бы при длительном устранении всякого регулирования объекта. Это отклонение непосредственно по регулируемой величине обычно наблюдать невозможно из-за того, что оно намного превышает допустимое отклонение. Можно только организовать **такое наблюдение** с помощью схемы рис. 2.5.2 при нормальной эксплуатации объекта (подразумевающей постоянное регулирование объекта).

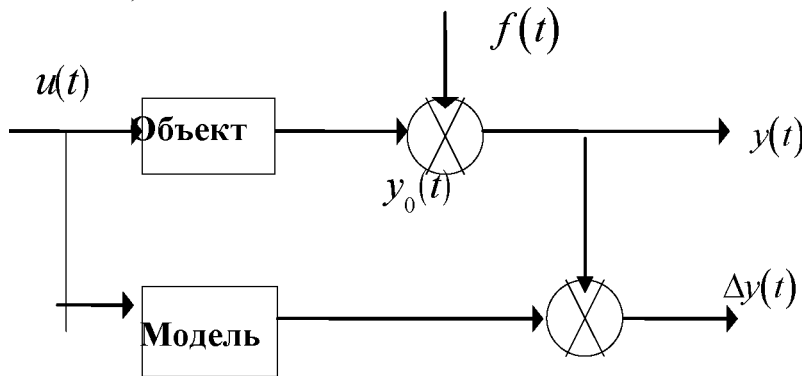


Рисунок 2.5.2.

$$\Delta y(t) = y(t) - y_0(t)$$

Поэтому δ в (2.5.2) обычно имеет сравнительно малые значения: $\delta \leq 0,2$.

В дальнейшем системы регулирования, удовлетворяющие условию 2.5.2) при малых δ , будут называться **системами высокой динамической точности**.

Графическая интерпретация условия высокой динамической точности состоит в том, что площадь под кривой спектральной плотности ошибки регулирования $S_{\varepsilon}(\omega)$ должна быть намного (в $1/\delta^2$ раза) меньше площади под кривой спектральной плотности возмущения $S_f(\omega)$. К примеру, при $\delta=0,2$ площадь уменьшается в 25 раз. Согласно рис. 2.5.3 спектральные плотности связаны так:

$$S_{\varepsilon} = |\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|^2 \times S_f(\omega),$$

где $\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)$ - комплексная частотная характеристика замкнутой САУ для ошибки по возмущению $f(t)$,

т.е.

$$\Phi_{\varepsilon f}(s) = \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1}{1+W(s)}.$$

Связь между АКФ $K_{\varepsilon}(\tau)$ и $S_{\varepsilon}(\omega)$:

Если $K_{\varepsilon}(\tau)$ рассматривается при $\tau = 0$, то получается дисперсия ошибки $D_{\varepsilon}(t) = K_{\varepsilon}(0)$:

$$K_{\varepsilon}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\varepsilon}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \quad (2.5.3)$$

Рассмотрим графическую интерпретацию (2.5.4)

$$|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)| = \left| \frac{1}{1+W(j\omega)} \right| = \frac{1}{|BA|} \quad (2.5.4)$$

Поскольку годограф $W(j\omega)$ имеет обычно вид, приведенный на рис. 2.5.3, то график $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|$ имеет характер, показанный на рис.2.5.4. Это следует из того, что графически величина $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|$ для произвольной частоты ω равна обратной длине вектора, проведенного из точки $(-1; j_0)$ к соответствующей точке $W(j\omega)$ (вектора ВА по рис. 2.5.3). Отсюда следует, что $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)| < 1$ только в интервалах низких частот $\omega \in [0; \omega_1]$, $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)| > 1$ при $\omega \in (\omega_1; \omega_2)$, включающем резонансную частоту ω_p . При $\omega > \omega_2$ кривая $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|$ постепенно приближается к единице. Уменьшение площади по кривой $S_{\varepsilon}(\omega)$, по сравнению с площадью по кривой $S_f(\omega)$, произойдет в том случае, когда в (2.5.4.) ординаты $S_f(\omega)$ умножаются на ординаты $|\Phi_{\varepsilon f}(j\omega)|$, меньше, чем единица. Это значит, что регулирование существует только в том случае, если спектр возмущения $S_f(\omega)$ занимает достаточно узкую полосу частот в низкочастотном диапазоне $\omega \in [0; \omega_{\max}]$, где АКФ $A_{\varepsilon f}(\omega)$ меньше единицы. Если требуется выполнить условие

высокой динамической точности (2.5.4), то спектр воздействия должен располагаться в весьма малой окрестности нулевой частоты, т.е. возмущения должны быть (относительно ω_1 , а тем более относительно ω_p) весьма низкочастотным (рис.2.5.4.).

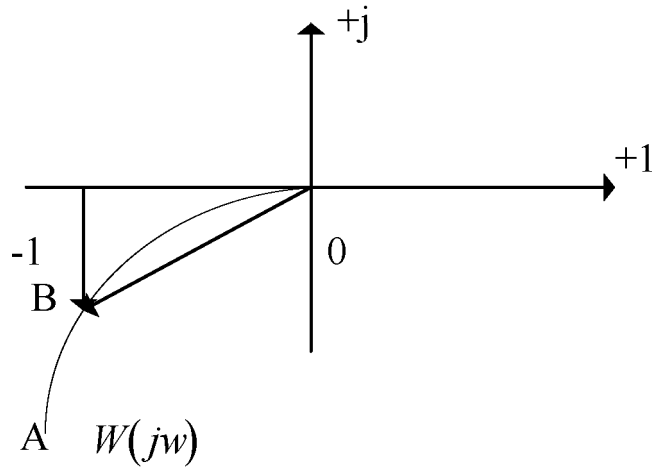


Рисунок 2.5.3.

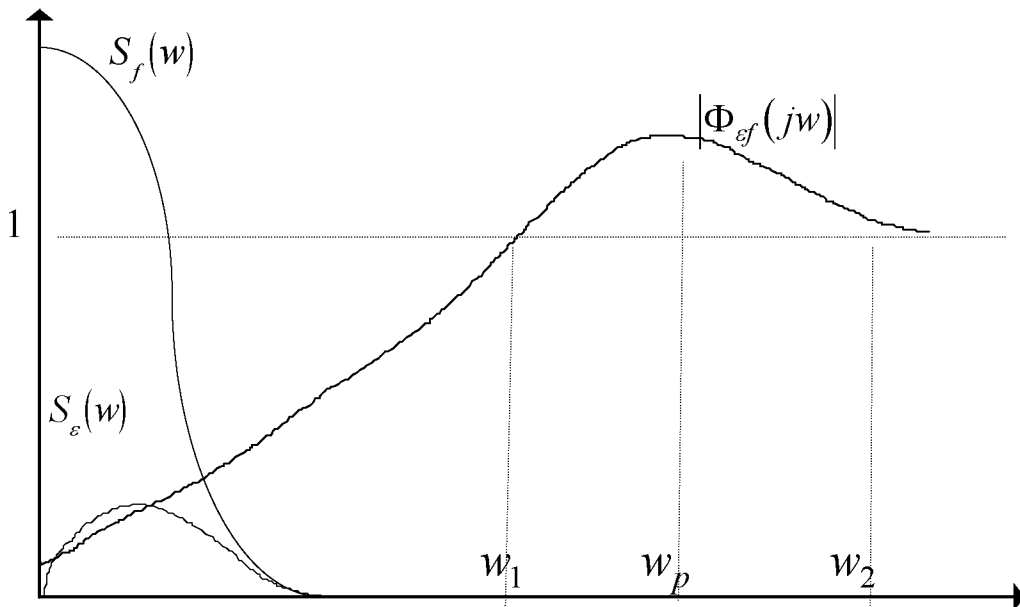


Рисунок 2.5.4.

Это обстоятельство позволяет разложить $A_{ef}(\omega) = |\Phi_{ef}(j\omega)|$ в ряд Тейлора по степеням ω и оставить в разложении только линейные члены. В результате для низкочастотного диапазона, близкого к нулевой частоте, выражение для $A_{ef}(\omega)$ для случая использования ПИ- и ПИД- регуляторов имеет вид:

$$A_{ef}(w) = \frac{T_u}{k_p k_u} w, \quad (2.5.5)$$

где k_u - коэффициент передачи объекта по регулирующему каналу, k_p - коэффициент передачи регулятора.

Дисперсию ошибки после подстановки (2.5.4) в (2.5.3) можно получить из условия:

$$D_\varepsilon(t) = \frac{T_u^2}{2\pi k_p^2 k_u^2} \int_{-\infty}^{\infty} S_f(w) w^2 dw, \quad (2.5.6)$$

откуда следует, что для минимизации СКО регулирования следует увеличить отношение $\frac{k_p}{T_u}$, т.е. $(\frac{k_p}{T_u} \rightarrow \max)$ при прежнем ограничении $M \leq M_g$. В плоскости параметров настройки это соответствует точке *A* (рис.2.5.5).

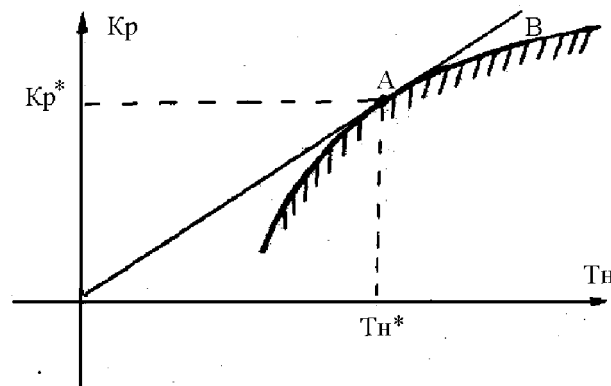


Рисунок 2.5.5. Граница допустимых значений показателя колебательности *M*.

При выполнении условий высокой динамической точности и при возможности аппроксимации характеристик объекта с $T_{b,i} = 0$ и $n \leq 2$ типовые ПИ - и ПИД-регуляторы могут считаться близкими к оптимальным.

Системы высокой эффективности обладают рядом важных особенностей:

1. Для расчета параметров на стройке таких систем, исходя из условия высокой динамической точности при случайных возмущениях, нет необходимости знать статистические характеристики этих

возмущений.

2. В расчете по существу исчезает второй этап (это наиболее трудоемкий этап) - поиск точки минимума критерия оптимальности.

3. Точка, соответствующая оптимальной настройке регулятора располагается на границе области допустимого запаса устойчивости и целиком определяется только частотными характеристиками регулирующего канала объекта в окрестности частоты резонанса замкнутой системы.

4. Спектр частот возмущений, приведенных к выходу объекта, занимает низкочастотный диапазон.

Опыт расчетов показывает, что когда учет статистических характеристик позволяет несколько улучшить качество функционирования системы, оптимум настройки, как правило, остается на линии границы заданного запаса устойчивости, лишь несколько сдвигаясь вправо (из точки А в точку В рис. 2.5.5). Поэтому даже в тех случаях, когда нет уверенности в том, что система относится к классу систем высокой эффективности, целесообразно расчет расчленить на два этапа:

1) принимая гипотезу о низкочастотном характере возмущений, сначала осуществить расчет изложенным выше способом (без учета статистических характеристик возмущений);

2) проверить справедливость принятой гипотезы, определив действительное значение СКО с учетом статистических характеристик возмущений в найденной точке оптимума, и выполнить оценку и ее приращения при вариации параметров настройки вдоль границы области заданного запаса устойчивости (точки А и В по рис.2.5.5). Это позволит либо подтвердить правильность гипотезы о низкочастотности возмущений, либо уточнить параметры настройки с минимальной затратой труда.

Оценка статистических характеристик возмущений на неавтоматизированном объекте представляет собой весьма трудоемкую задачу. Разбиение процесса расчета на два этапа целесообразно еще и с той точки зрения, что позволяет ввести систему регулирования в эксплуатацию уже после первого этапа, при неизвестных еще характеристиках возмущений. Затем по результатам нормального функционирования системы могут быть получены (например, с использованием модели) статистических характеристик возмущений и может быть произведено соответствующее уточнение параметров настройки.

2.6. Параметрический синтез в частотной области

В практической деятельности параметрический синтез алгоритма управления (выбор оптимальных параметров регулятора) может осуществляться также с помощью инженерных методов, когда удается избежать задачи минимизации функционала. На инженерном языке параметрический синтез алгоритма управления часто называется настройкой автоматического регулятора.

Одним из широко известных инженерных методов является графоаналитический метод настройки, использующий частотные характеристики объекта и системы.

Определение оптимальной настройки автоматического регулятора (алгоритма управления) путем минимизации функционалов для ε_f или σ_{ef} хотя и обеспечивает устойчивость системы, часто не позволяет получать процессы требуемого качества. К примеру, в таких системах переходный процесс имеет характер медленно затухающих колебаний, что в конечном итоге делает систему непригодной к эксплуатации. С учетом этого задача параметрической оптимизации решаются при дополнительных ограничениях.

При настройке САУ эмпирическим методом дополнительным ограничением служит заданный тип переходного процесса.

При графоаналитическом методе расчета оптимальной настройки дополнительное ограничение накладывается, в частности, на показатель колебательности M . Определение оптимальных параметров настройки осуществляется в два этапа.

На первом этапе в пространстве настраиваемых параметров регулятора определяется граница области, где выполняется ограничение на колебательность переходного процесса.

$$M \leq M_g, \quad (2.6.1)$$

где M_g - допустимое (заданное) значение колебательности, $M = A_3(\omega_p)/A_3(0)$ - значение колебательности, определяемое по АЧХ замкнутой САУ $A_3(\omega)$, ω_p -резонансная частота.

В системах с ПИ-регулятором настраиваемыми параметрами являются коэффициент передачи k_p и постоянная интегрирования T_u , а в системах с ПИД-регулятором - k_p , T_u и постоянная дифференцирования T_g . В последнем случае в рассмотрение вводят величину $\alpha = T_g/T_u$, так что в процессе настройки определяют оптимальное сочетание величин k_p, T_u, α .

На втором этапе поиска оптимальных параметров регулятора в найденной на первом этапе области заданного качества определяется точка, минимизирующая функционалы для ε_f или σ_{ef} .

В системах с П-, ПИ-, ПИД-регуляторами $A_3(0)=1$ т.е. для таких систем отношение $A_3(\omega_p)/A_3(0)$ совпадает со значениями резонансного типа АЧХ замкнутой САУ $A_3(\omega_p)$. Значение резонансного пика $A_3(\omega_p)$ может быть определено непосредственно по КЧХ $W(j\omega)$ разомкнутой части САУ. Для этого на комплексной плоскости следует построить окружности с параметрами:

$$r_m = M/M^2 - 1; \quad U_m = M^2/M^2 - 1, \quad (2.6.2)$$

где U_m - расстояние от начала координат до центра окружности, который располагается на отрицательной вещественной полуоси; r_m - радиус окружности.

Значение показателя M т.е. $A_3(\omega_p)$ определяется индексом M той окружности, которой касается годограф $W(j\omega)$.

С учетом этого построение границы допустимой области в пространстве настраиваемых параметров производится в следующей последовательности.

1. Построить годограф $W_0(j\omega)$, т.е. КЧХ ОУ по регулирующему каналу.

2. Провести луч OL (рис. 2.6.1) из начало координат под углом

$$\gamma = \arcsin(1/M_g) = \arcsin(r_g/U_g).$$

Луч проводится в третьем квадранте, где γ откладывается от вещественной полу оси.

3. Используя годограф $W_0(j\omega)$ построить семейство комплексных частотных характеристик $W_1(j\omega)$ разомкнутой системы для различных значений T_n в случае ПИ-регулятора, T_n и α в случае ПИД-регулятора.

$$W_1(j\omega) = W_{1p}(j\omega) \cdot W_0(j\omega),$$

где $W_{1p}(j\omega)$ -комплексная частотная характеристика регулятора с единичным коэффициентом передачи.

Если определяются оптимальные настройки ПИД-регулятора, то для каждого фиксированного значения α получается семейство характеристик $W_{1p}(j\omega)$.

4. Путем подбора на рисунок нанести окружности с параметрами U_m и r_m , каждая из которых должна одновременно прямой OL и одного из годографов $W_{1p}(j\omega)$. Частотные характеристики $W_{1p}(j\omega)$ достаточно строить в пределах сектора, образованного отрицательной вещественной полуосью и прямой OL . Отношения требуемого (заданного) радиуса r_g или величины U_g , которые определяются по соотношению (2.6.2) с учетом допустимого значения колебательности M_g , к полученным r_{mi} и U_{mi} показывает во сколько раз необходимо изменить единичный коэффициент передачи регулятора для того, чтобы годограф разомкнутой САУ $W(j\omega)$ при соответствующем значении T_{mi} касался окружности с заданным показателем колебательности M_g , т.е. предельное значение коэффициента передачи регулятора

$$K_{pi} = r_g / r_{mi} = U_g / U_{mi},$$

когда еще выполняется ограничение (9).

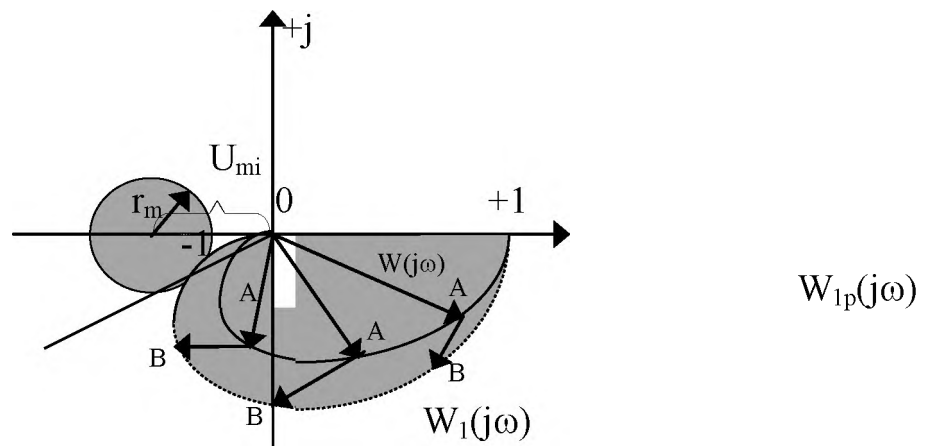


Рисунок 2.6.1 Порядок построения границ допустимой области

5. В плоскости параметров T_n , K_p , откладывая найденные значения T_{mi} , K_{pi} , необходимо построить границу области допустимых значений показателя колебательности M .

Когда построение ведутся для ПИД-регулятора, получается семейство границ, каждая из которых соответствует одному фиксированному значению α . Рассмотрим порядок графического построения годографа $W_1(j\omega)$.

Пусть характеристика $W_0(j\omega)$ объекта управления построена (рис. 2.6.1). Передаточная функция разомкнутой части САУ представляется в виде

$$W(S) = K_p \cdot W_{1p}(S) = K_p \cdot W_1(S),$$

где k_p - коэффициент передачи регулятора, $W_{lp}(S)$ передаточная функция регулятора с единичным коэффициентом передачи; $W_i(S)$ - передаточная функция разомкнутой части САУ с единичным коэффициентом передачи.

Для построения характеристики $W_1(j\omega)$ используют характеристику $W_0(j\omega)$ на основании соотношений:

1) для САУ с ПИ-регулятором:

$$\begin{aligned} W_1(S) &= \left(1 + \frac{1}{T_I S}\right) W_0(S); \\ W_1(j\omega) &= \left(1 - j \frac{1}{T_I \omega}\right) W_0(j\omega). \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

2) для САУ с ПИД-регулятором:

$$\begin{aligned} W_1(S) &= \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S\right) W_0(S); \\ W_1(j\omega) &= \left[1 + j \left(T_D \omega - j \frac{1}{T_I S}\right)\right] W_{\text{и}}(j\omega) = \\ &= \left[1 - \left(j \frac{1}{T_I S} - T_D \omega\right)\right] W_{\text{и}}(j\omega). \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

Из (2.6.3) следует, что

$$W_1(j\omega) = W_0(j\omega) - j \frac{1}{T_I \omega} W_{\text{и}}(j\omega),$$

т.е. если $W_0(j\omega)$ при произвольной частоте ω соответствует вектор \vec{OA} следовательно $|W_0(j\omega)| = |\vec{OA}|$, то для получения вектора $W_1(j\omega)$ необходимо к вектору \vec{OA} добавить вектор \vec{AB} длиной $|W_0(j\omega)|/T_I \omega$ и повернутый относительно вектора \vec{OA} на угол -90° .

Один из годографов, полученных указанным образом, показан на рис.2.6.1 пунктирной линией.

Рассуждая аналогично для ПИД-регулятора можно получить следующие условия построения характеристики $W_1(j\omega)$ по характеристике $W_0(j\omega)$. К вектору \vec{OA} необходимо добавить вектор \vec{AB} длиной $\left(\frac{1}{T_I \omega} - T_D \omega\right) \cdot |W_0(j\omega)|$, повернутый под углом:

а) -90° , если $\frac{1}{T_I \omega} > T_D \omega$;

б) $+90^\circ$, если $\frac{1}{Tu\omega} < Tg\omega$.

С учетом того, что $\alpha = Tg|Tu$ или $Tg = \alpha Tu$ последующее неравенство преобразуется к виду

$$Tu\omega > \frac{1}{\sqrt{\alpha}}.$$

Рассмотрим второй этап настройки, принимая, что граница области допустимых значений M построена (рис.2.5.5). Указанная на рисунке граница является характерной для ПИ-регулятора.

Оптимальные параметры настройки определяются как максимум отношения Kp/Tu , т.е. точка касания прямой, проведенной из начала координат, границы.

Подобный подход распространяется на настройку систем высокой динамической точности (2.5.2), для которых частотная характеристика $|W_{\varepsilon\omega}(j\omega)|$ при использовании типовых ПИ- и ПИД-регуляторов приближенно может быть представлена в виде

$$|W_{\varepsilon\omega}(j\omega)| \approx \frac{T_0\omega}{K_0K_p}. \quad (2.6.5)$$

После подготовки (12) в (4) функционал качества приобретает вид:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{T_u^2}{2\pi K_0^2 K_p^2} \int_{-\infty}^{\infty} Sg(\omega)\omega^2 d\omega,$$

на основании которого задачу оптимальной настройки можно сформулировать следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{K_p}{T_u} \rightarrow \max, \\ M \leq Mg \end{array} \right\} \quad (2.6.6)$$

Из вышесказанного следует, что при графоаналитическом методе расчета оптимальной настройки необходимо:

1) допуская гипотезу низкочастотного характера возмущений, т.е. высокой динамической точности САУ, найти оптимальную настройку изложенным способом;

2) выполнить проверку принятой гипотезы путем вычисления функционала (4) в точке A (рис.2.5.5) и найти ее приращение при вариации параметров настройки вдоль границ (точка B). Если значения

функционала отличаются мало, то гипотеза подтверждается и рассчитанные настройки являются оптимальными. В противном случае следует уточнить оптимальные значения параметров настройки путем учета статистических характеристик возмущений.

Особенность второго этапа настройки ПИД-регулятора заключается в том, что, во-первых, характерный вид границы области заданного качества отличается от границы для ПИ-регулятора (рис. 2.6.2), во-вторых, имеется семейство границ (соответственно заданным значениям α), в-третьих, для определения оптимальной настройки (определения максимума отношения Kp/Tu) необходимо построить дополнительную зависимость

$$(Kp/Tu)_{max} = f(\alpha).$$

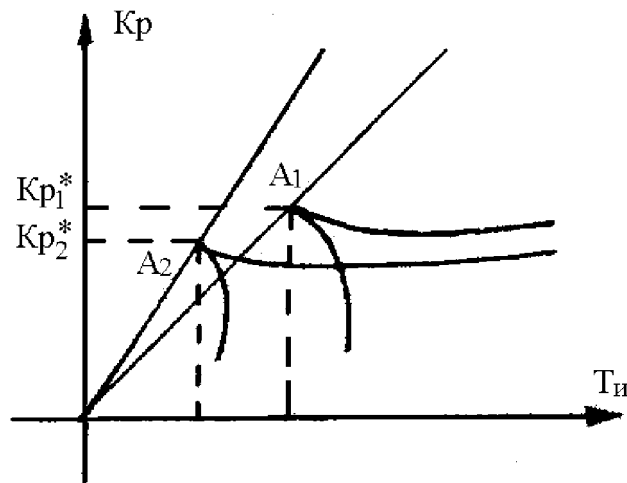


Рисунок 2.6.2 Границы допустимой области M для САУ с ПИД-регулятором

2.7 Табличная настройка алгоритмов управления

Выбор оптимального алгоритма управления может быть осуществлен также на основе другого упрощенного инженерного подхода, когда критерием качества служит вид переходного процесса. Данный подход, известный как табличный метод настройки [], может быть назван также эмпирическим, т. к.:

- для выбора требуемого типового закона управления используются не только расчетные соотношения, но и номограммы, составленные по результатам экспериментальных исследований;

- алгоритмы настройки, сведенные в таблицу, также получены по результатам экспериментальных исследований.

Табличный метод настройки предусматривает 2 этапа:

- выбор закона управления $W_P^P(s)$, который для упрощения записи далее обозначим как $W_P(s)$;

- настройка выбранного закона управления $W_P(s)$, используя табличные соотношения.

2.7.1 Выбор закона управления

Для расчета промышленных систем регулирования вводят следующие типовые переходные процессы:

- апериодический (условное обозначение А);
- с 20%-ным перерегулированием (П);
- с минимальным значением ИКК (М).

Если учитывать, что тип переходного процесса в САУ определяется принятым законом регулирования и параметрами настройки регулятора, то становится ясным возможность решения обратной задачи - задачи выбора алгоритма управления и его настройки по заданному типовому переходному процессу.

Переходной процесс САУ (рис. 2.7.1) характеризуется следующими основными показателями качества:

- максимальное динамическое отклонение Δy_M ;
- остаточное отклонение ε ;
- перерегулирование $\eta = \Delta y_2 / \Delta y_M$ при возмущении по нагрузке или $\eta = y_M / y_\infty$ - при возмущении по задающему воздействию, где y_M - максимальное значение выходной переменной, y_∞ - установившееся значение выходной переменной;
- показатель колебательности M , характеризующий амплитудно-частотную функцию замкнутой САУ;
- длительность переходного процесса t_p ;
- суммарная площадь, ограниченная кривой переходного процесса, или величина ИКК.

Обоснованием выбора того или другого типового переходного процесса (рис. 2.7.2) служат технологические требования к объекту и характер внешних возмущений.

При апериодическом переходном процессе отсутствует перерегулирование, время регулирования минимальное, а динамическое

отклонение Δy_M довольно большое.

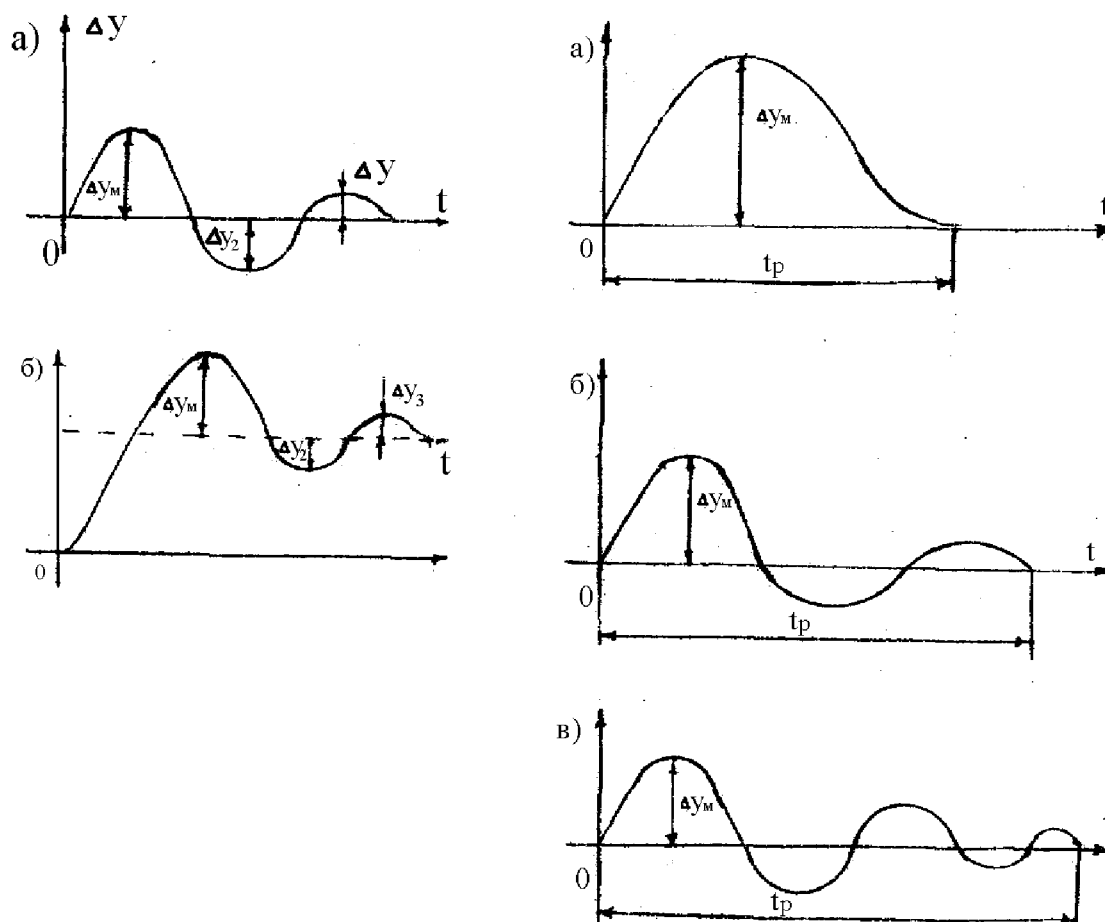


Рисунок 2.7.1 Переходные процессы в САУ: а- возмущение по нагрузке; б- возмущение по заданию.

Рисунок 2.7.2 Типовые переходные процессы: а – аperiodический; б - с 20%-ным перерегулированием; в - с минимумом ИКК.

Процесс с 20%-ным перерегулированием обеспечивает минимальную длительность первого полупериода, меньшее по сравнению с аperiodическим процессом динамическое отклонение, однако допускает перерегулирование.

Процесс с минимумом ИКК характеризуется малой величиной динамического отклонения, наибольшим перерегулированием и длительностью переходного процесса.

Перерегулирование η и показатель колебательности M при возмущении по нагрузке примерно связаны следующим образом:

Таблица 2.7.1

M	2,38	2,09	1,60	1,55	1,29
η , [%]	60	45	38	32	22

2.7.2 Табличная настройки алгоритмов управления

При табличной настройке алгоритмов управления предполагается, что динамическая характеристика объекта аппроксимируется одной из следующих передаточных функций (табл. 2.7.2):

Таблица 2.7.2

№ п/п	передаточная функция	тип объекта
1	$W_o(s) = \frac{1}{T_o s}$	астатический
2	$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o s + 1}$	статический
3	$W_o(s) = \frac{1}{T_o s} e^{-\tau_o s}$	астатический с запаздыванием
4	$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o s + 1} e^{-\tau_o s}$	статический с запаздыванием

Если параметры передаточных функций неизвестны, их можно определить по экспериментально снятой разгонной кривой. При этом наиболее простые, следовательно, наиболее грубые оценки получаются путем графической аппроксимации разгонной кривой.

Более точные оценки могут быть получены на основе приводимых ниже соотношений:

$$\tau_0 = \frac{t_2 \lg(1 - y_1) - t_1 \lg(1 - y_2)}{\lg(1 - y_1) - \lg(1 - y_2)},$$

$$T_0 = \left| \frac{t_1 - \tau_0}{2,303 \lg(1 - y_1)} \right| = \left| \frac{t_2 - \tau_0}{2,303 \lg(1 - y_2)} \right|,$$

где t_1 - время, соответствующее точке перегиба разгонной кривой, а при ее отсутствии соответствующее условию

$$y(t_1) \approx (0,1 - 0,15) \Delta y_\infty$$

t_2 - время, выбираемое из условия

$$y(t_2) \approx (0,8 - 0,9)\Delta y_{\infty};$$



Для статических объектов коэффициент передачи k_o находят из условия

$$k_o = \Delta y_{\infty} / \Delta u.$$

Для выбора типового алгоритма управления необходимо знать:

- 1) параметры динамической характеристики объекта k_o, T_o, τ_o ;
- 2) максимально допустимое динамическое отклонение Δy_m ;
- 3) желаемое (допустимое) перерегулирование, которое задается типом переходного процесса;
- 4) допустимую статическую ошибку ε ;
- 5) допустимую длительность переходного процесса;
- 6) максимальное входное возмущение Δu ;

Класс алгоритма управления ориентировочно можно выбрать по соотношению τ_o / T_o (табл. 2.7.3).

Таблица 2.7.3

τ_o / T_o	класс алгоритма
$< 0,2$	Релейный
$< 1,0$	Непрерывный
$> 1,0$	Импульсный

Непрерывный типовой закон регулирования, обеспечивающий заданные показатели качества, можно определить в следующей последовательности.

1. Находят динамический коэффициент регулирования k_d для статических объектов

$$k_d = \Delta y_m / k_o \cdot \Delta u,$$

для астатических объектов

$$k_d = \Delta y_m T_o / \tau_o \cdot \Delta u.$$

2. По табл. 2.7.4 для астатических объектов или графикам (рис. 2.7.3) для статических объектов выбирают типовой алгоритм управления, обеспечивающий необходимое значение k_d .

Таблица 2.7.4 Динамические коэффициенты регулирования k_d на астатических объектах

Типовой алгоритм	Типовой переходный процесс		
	А	П	М
П	2,9	1,4	-
ПИ	1,4	1,3	0,9
ПИД	1,3	1,1	0,8

3. Проверяют по табл. 2.7.5 для астатических объектов и по графикам (рис. 2.7.3) для статических объектов, обеспечивается ли требуемое время регулирования t_p . Если желаемое значение t_p не обеспечивается, необходимо выбрать более сложный закон регулирования.

Таблица 2.7.5 Относительное время регулирования для астатических объектов

Типовой регулятор	Типовой переходный процесс		
	А	П	М
П	6	8	-
ПИ	14	16	18
ПИД	9	12	13

4. По рис. 2.7.5 находят статическую ошибку ε . В том случае, если она больше допустимой, то П- закон регулирования заменяют на ПИ-закон. Оптимальную настройку регуляторов производят на основании таблиц 4.6 и 4.7.

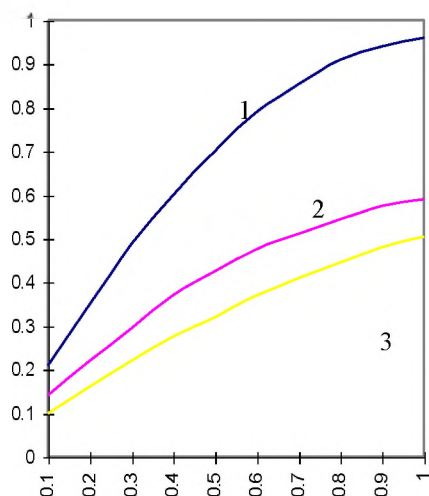


Рисунок 2.7.4 Определение статической ошибки в САР (статические объекты и непрерывные регуляторы):

1- процесс А;
2- процесс П;
3- процесс М.

Таблица 2.7.6 Алгоритмы настройки регуляторов на астатических объектах

Типовой регулятор	Типовой переходный процесс		
	А	П	М
И	$k_p = 0,4/(\tau_o/T_o)$	$k_p = 0,7/(\tau_o/T_o)$	-
ПИ	$k_p = 0,4/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 6\tau_o$	$k_p = 0,7/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 3\tau_o$	$k_p = 1/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 4\tau_o$
ПИД	$k_p = 0,6/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 5\tau_o$ $T_D = 0,2\tau_o$	$k_p = 1,1/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 2\tau_o$ $T_D = 0,4\tau_o$	$k_p = 1,4/(\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 1,6\tau_o$ $T_D = 0,5\tau_o$

Таблица 2.7.7 Алгоритмы настройки регуляторов на статических объектах

Типовой регулятор	Типовой переходный процесс		
	А	П	М
И	$k_{IP} = 1/(4,5\tau_o/T_o)$	$k_{IP} = 1/(1,7\tau_o/T_o)$	$k_{IP} = 1/(1,7\tau_o/T_o)$
П	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$
ПИ	$k_p = 0,6/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 1,6\tau_o$	$k_p = 0,7/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 1,6\tau_o$	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 1,6\tau_o$
ПИД	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 0,6\tau_o$ $T_D = 0,4\tau_o$	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 0,7\tau_o$ $T_D = 0,4\tau_o$	$k_p = 1/(k_o\tau_o/T_o)$ $T_{II} = 1,3\tau_o$ $T_D = 0,5\tau_o$

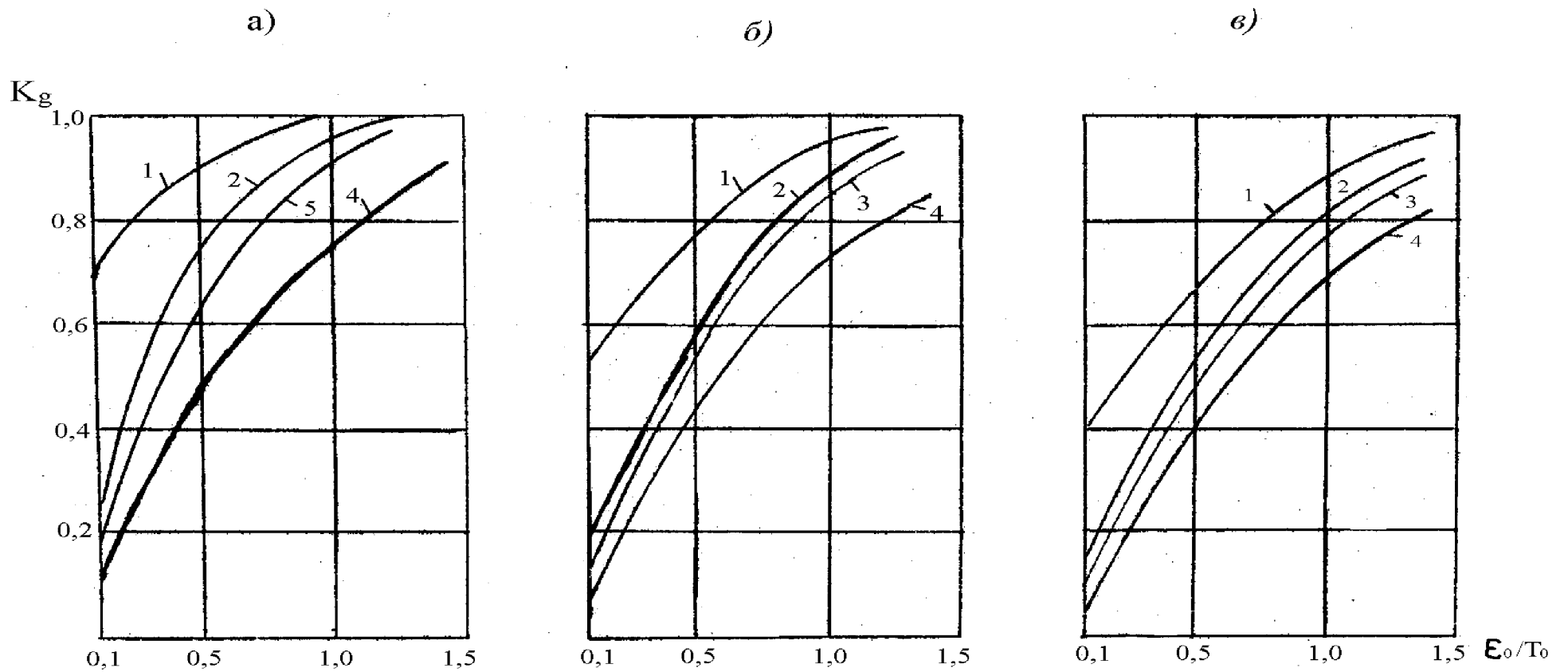


Рисунок 2.7.3 Динамические коэффициенты регулирования на статических объектах: 1-И-регулятор; 2-П-регулятор; 3-ПИ-регулятор; 4-ПИД-регулятор; а- апериодический процесс; б- процесс с 20%-ным перерегулированием; в- процесс с минимальным ИКК.

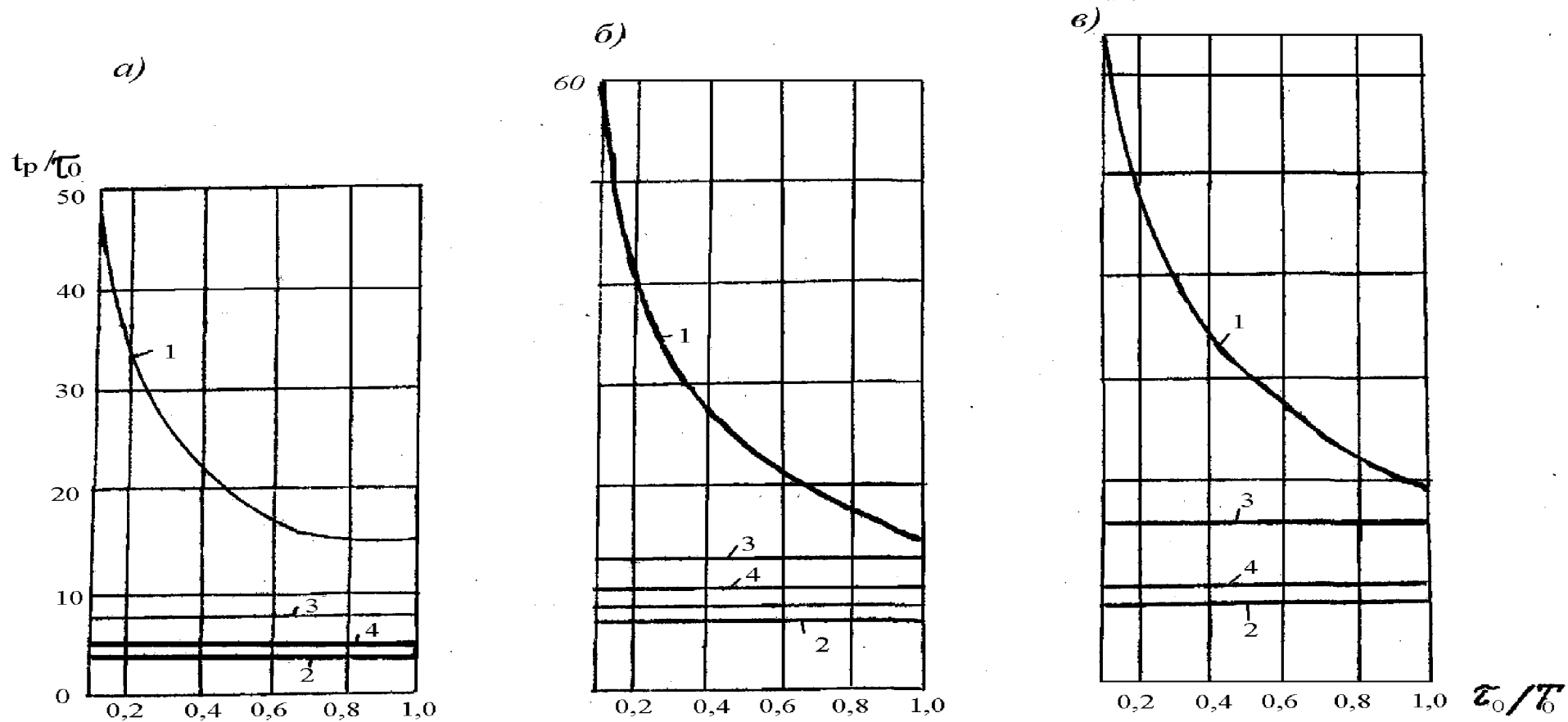


Рисунок 2.7.4 Время регулирования на статических объектах: а- аperiodический процесс; б- процесс с 20%-ным перерегулированием; в- процесс с минимальным ИКК; 1-И-регулятор; 2-П-регулятор; 3-ПИ-регулятор; 4-ПИД-регулятор.

3 ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ЦИФРОВЫХ САУ

3.1 Цифровые системы автоматизации и управления

Основные структуры. В настоящее время в управлении производством всё чаще используются цифровые вычислительные машины как устройство управления и в связи с этим широкое применение находят цифровые системы автоматизации и управления (ЦСАУ) промышленными объектами. Согласно классическому определению цифровой называется всякая САУ, в составе которой есть хотя бы один цифровой элемент. Таким элементом может быть датчик, преобразующие устройства или устройство управления. Наибольший интерес представляет ситуация, когда в системе имеется цифровое устройство управления. Формирование управляющих воздействий в таких системах осуществляется цифровыми вычислительными устройствами (ЦВУ), которые оперируют с дискретными (цифровыми) последовательностями данных.

Типовые структуры подсистемы управления ЦСАУ показаны на рис.3.1.1 и 3.1.2.

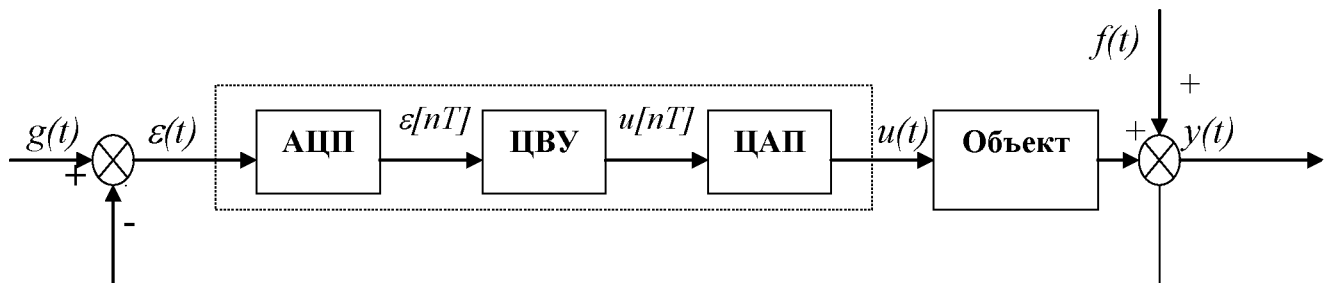


Рисунок 3.1.1 Функциональная структура ЦСАУ.

Цифровая система управления состоит (рис. 3.1.1) из аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), ЦВУ, цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и объекта. В АЦП осуществляется преобразование непрерывного сигнала ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ в числовую последовательность $\varepsilon[nT]$ путем квантования непрерывного сигнала по времени и по уровню. В ЦСАУ ошибка управления $\varepsilon[nT]$ определяется и соответственно управляющее воздействие $u[nT]$ вырабатывается лишь в дискретные моменты времени $t = nT$. При этом интервал следования чисел T называется периодом квантования, $n = 0, 1, 2, \dots$, а

последовательность дискретных моментов времени nT называется моментами съема информации. ЦАП преобразует цифровой командный код, получаемый от ЦВУ, в аналоговый сигнал управления для объекта, который исполнительным механизмом преобразуется в непрерывное перемещение рабочего органа.

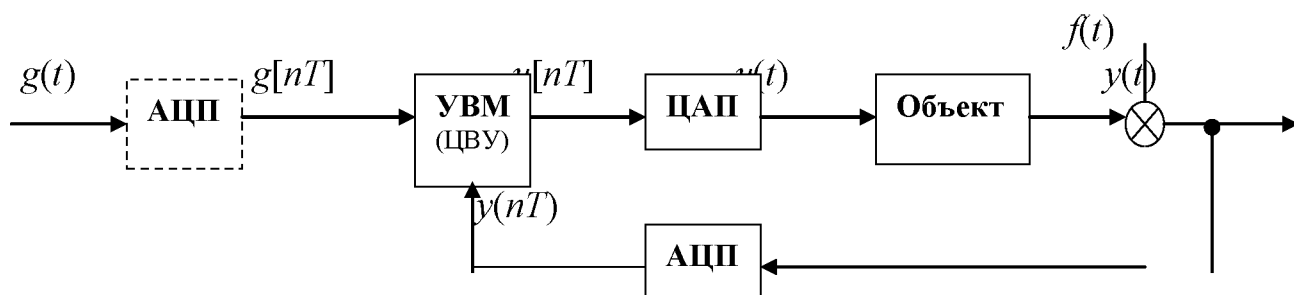


Рисунок 3.1.2 Функциональная структура ЦСАУ.

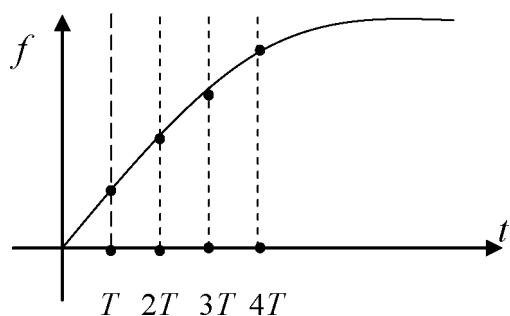
Функциональная структура, приведенная на рис. 3.1.2, отличается от предыдущей структуры тем, что задающее воздействие $g(t)$ предварительно преобразуется в цифровой сигнал $g[nT]$ и затем подается на вход УВМ, которая выполняет также роль сравнивающего устройства. Так как сравнивающее устройство дискретное в цепи обратной связи необходимо предусмотреть АЦП.

Большинство объектов автоматизации являются непрерывными и использование на них цифровых устройств управления обуславливает необходимость применения АЦП и ЦАП: 1) ЦАП необходим для преобразования текущего значения цифрового кода управления в непрерывный сигнал для исполнительного механизма; 2) АЦП необходим для преобразования непрерывного значения регулируемой величины или сигнала рассогласования в цифровой код для УВМ.

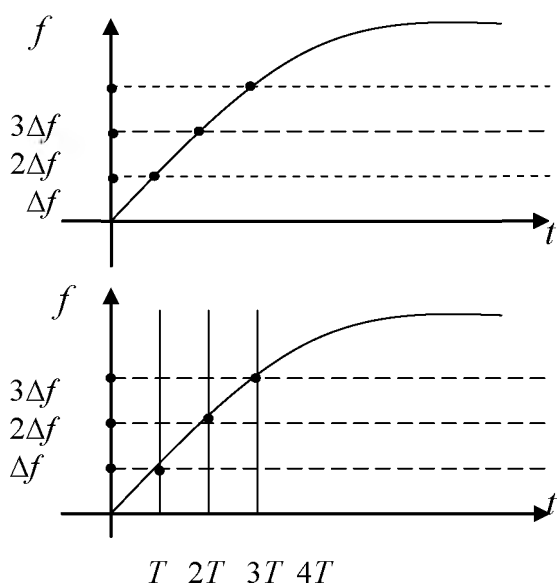
Шаг квантования по уровню, который зависит от длины машинного слова, в современных управляющих вычислительных машинах (УВМ) обычно настолько мал, что им в нормальных режимах системы управления можно пренебречь. [16-20]. Таким образом, в большинстве случаев, в ЦСАУ можно пренебречь эффектами квантования по уровню и процессы преобразования информации в ней можно представлять лишь на основе амплитудно-импульсной модуляции. В математическом смысле это приводит к тому, что уравнения ЦСАУ имеют такой же вид как уравнения амплитудно-импульсных систем – они представляются разностными уравнениями. Таким образом, для исследования импульсных и цифровых САУ могут быть использованы одинаковые аналитические методы.

Квантование и модуляция сигналов. Различают три вида дискретных систем: импульсные, релейные и цифровые. Эти системы получаются в результате квантования непрерывных сигналов, для чего в состав непрерывной системы необходимо включить квантователь - элемент, выполняющий операцию квантования.

В импульсных системах производится квантование сигнала $f(t)$ по времени, в релейных - по уровню, а в цифровых - по времени и по уровню, т. е. комбинированное квантование (рис. 3.1.3).



При квантовании по времени на выходе квантователя будут выделены мгновенные значения непрерывного сигнала в кратные T моменты времени, т. е. $t = nT$.



При квантовании по уровню происходит выделение равностоящих уровней значений непрерывного сигнала, кратных Δf , т. е. $f = n\Delta f$.

При комбинированном квантовании происходит выделение равностоящих уровней значений $f = n\Delta f$ непрерывного сигнала в дискретные равностоящие промежутки времени $t = nT$.

Рисунок 3.1.3.

Суть квантования сигнала состоит в том, что непрерывный сигнал заменяется квантователем на эквивалентную последовательность прямоугольных импульсов. Последовательность считается эквивалентной в том смысле, по ней можно однозначно восстановить исходный непрерывный сигнал. Этого можно добиться соблюдением условий импульсной теоремы Котельникова [18-20]. В теории импульс-

ных систем считается, что импульсы имеют прямоугольную форму, т. к. легко доказать, что действие кратковременного импульса определяется не его формой, а площадью. Поэтому форма импульса не имеет значения. Но предположение прямоугольности импульса позволяет оптимизировать математические выкладки.

Прямоугольный импульс характеризуется высотой (амплитудой) A , шириной τ , периодом следования T , относительным положением импульса внутри периода следования α . Эти параметры импульса могут быть носителем информации, т. е. переносчиком информации, и при квантовании сигнала необходимо решить вопрос какой из указанных выше параметров будет информативным. В зависимости от этого различают амплитудно-импульсные системы (АИС), широтно-импульсные системы (ШИС), фазо-импульсные системы (ФИС) и частотно-импульсные системы (ЧИС). Процедура "записи" информации в импульс называется модуляцией. Используются три вида модуляции импульсной последовательности:

- амплитудно-импульсная модуляция (АИМ) - амплитуда импульса A изменяется пропорционально мгновенным значениям входного сигнала в моменты времени $t = nT$;
- широтно-импульсная модуляция (ШИМ) - ширина импульса τ пропорциональна мгновенным значениям входного сигнала при $t = nT$;
- время-импульсная модуляция (ВИМ) - период следования T или относительное положение импульса α пропорциональны мгновенным значениям входного сигнала при $t = nT$.

При использовании АИМ порождаются АИС, использовании ШИМ – ШИС. ВИМ приводит к еще двум разновидностям (классам) импульсных систем: 1) ФИС, в которых относительное положение импульса α пропорционально мгновенным значениям входного сигнала при $t = nT$; 2) ЧИС, в которых период следования T пропорционален мгновенным значениям входного сигнала при $t = nT$. Известно, что период импульсной последовательности задает его частоту.

Преимущества ЦСАУ по сравнению с непрерывными системами следующие:

- 1) большая помехоустойчивость;
- 2) неограниченный объем и срок хранения информации;
- 3) гибкость;
- 4) мультизадачность;
- 5) более широкая функциональность;

- б) уменьшение габаритов и энергопотребления;
- 7) простота схемной реализации.

Помехоустойчивость есть свойство системы, когда предотвращаются произвольные изменения сигналов, а следовательно свойств системы, под влиянием случайных факторов. Высокая помехоустойчивость ЦСАУ обеспечивается более высокой помехоустойчивостью цифрового сигнала по сравнению с аналоговым.

Неограниченный объем и срок хранения информации достигается наличием в составе ЦСАУ элементов краткосрочной и долгосрочной памяти.

Гибкость ЦСАУ проявляется на уровне аппаратного и программного обеспечения. Основа аппаратной гибкости состоит в том, ЦСАУ строятся по модульному принципу, что позволяет из ограниченного количества функциональных модулей за короткий срок получить путем соответствующего конфигурирования различные по свойствам системы, наилучшим образом отвечающие характеру решаемой задачи. Программная гибкость обозначает возможность смены алгоритмов управления и контроля путем загрузки в память УВМ соответствующих программ. Программа цифрового регулятора может быть изменена в соответствии с требованиями проектировщиков или приспособлена к характеристикам объекта, без каких – либо изменений в аппаратном обеспечении.

Мультизадачность, т. е. возможность одновременного решения нескольких задач, связано с большой тактовой частотой работы современных ЭВМ, в том числе и УВМ. Решению каждой задачи УВМ поочередно отводится некоторое время, после чего эта процедура повторяется многократно в режиме разделения времени. Место задачи, которая уже решена, занимает новая задача. При большом быстродействии УВМ создается впечатление, что УВМ одновременно решает множество задач. Мультизадачность УВМ позволяет создавать так называемые многоканальные ЦСАУ.

Более широкая функциональность ЦСАУ также обеспечивается наличием в ее составе УВМ, которая служит не просто как многоканальный автоматический регулятор, но как устройство обработки и хранения информации, решая также задачи научного, экономического и организационного характеров.

Уменьшение габаритов и энергопотребления есть следствие достижений современной микроэлектроники, когда микроминиатюризация позволяет создавать мощные вычислительные элементы при

малых габаритах, весе и энергопотреблении.

Простота схемной реализации объясняется с одной стороны тем, что цифровые устройства создаются из меньшего набора функциональных блоков и узлов, чем аналоговые устройства, и с другой стороны тем, что современные цифровые устройства проектируются и реализуются на уровне узлов и блоков, а не элементов.

В ЦСАУ имеет место также повышенная чувствительность и большая надежность по сравнению в аналоговых системах.

Для разработки математических моделей функциональные структуры ЦСАУ (рис. 3.1.1, 3.1.2) представляются в эквивалентной форме, где реальные физические элементы системы заменяются их гипотетическими эквивалентами, для которых существуют математические модели. Эти вопросы рассмотрены в пункте 3.2. Эквивалентная цифровая динамическая система порядка l может быть описана линейным разностным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$a_l y[(n-l)T] + a_{l-1} y[(n-l+1)T] + \dots + a_1 y[(n-1)T] + a_0 y[nT] = b_m u[(n-m)T] + b_{m-1} u[(n-m+1)T] + \dots + b_1 u[(n-1)T] + b_0 u[nT]. \quad (3.1.1)$$

Из этого уравнения непосредственно следует рекуррентная формула определения входной последовательности $y[nT]$ при заданной входной последовательности $u[nT]$:

$$y[nT] = \frac{b_m}{a_0} u[(n-m)T] + \dots + \frac{b_1}{a_0} u[(n-1)T] + \frac{b_0}{a_0} u[nT] - \frac{a_l}{a_0} y[(n-l)T] + \dots + \frac{a_1}{a_0} y[(n-1)T]. \quad (3.1.2)$$

Как следует из (3.1.2) для вычисления $y[nT]$ должна быть задана входная последовательность и l значений выходного сигнала $y[-lT]$, ..., $y[-T]$, предшествующих моменту появления входного воздействия, т.е. должна быть заданы начальные условия.

3.2. Эквивалентная структурная схема ЦСАУ

Для выполнения задач анализа и синтеза цифровых систем управления применяются формализованные математические методы, которые требуют знания математических моделей системы. Как это представлено на функциональной схеме (см. рис. 3.1.1, 3.1.2), основ-

ными элементами цифровой системы являются АЦП, ЦАП, ЦВУ, процессы в которых представить в математическом виде невозможно [16-20,31,32].

3.2.1 Дельта - импульсный модулятор

К дискретным числовым последовательностям не могут быть непосредственно применены интегральные преобразования Фурье и Лапласа, т.к. по отношению к таким последовательностям вообще лишено смысла понятие интеграла. Для устранения затруднений вводится эквивалентная замена числовых последовательностей последовательностями модулированных дельта - импульсов (единичных импульсов), к которым могут быть применены преобразования Фурье и Лапласа.

Связь последовательностей выражается формулой:

$$u_n(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]\delta(t - nT), \quad (3.2.1)$$

где $u_n(t)$ - последовательность дельта-импульсов, $u[nT]$ - последовательность чисел.

Таким образом, каждый член числовой последовательности заменяется дельта - импульсом соответствующей последовательности.

Спектр последовательности (3.2.1) определяется преобразованием Фурье от $u_n(t)$:

$$U^*(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]\delta(t - nT) \right] e^{-jt\omega} dt$$

или

$$U^*(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]e^{-jnt\omega} \quad (3.2.2)$$

Сумма (3.2.2) называется дискретным преобразованием Фурье.

Дискретное двустороннее преобразование Лапласа (Д- преобразование) определяется интегралом:

$$D\{u_n(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]\delta(t - nT) \right] e^{-st} dt$$

или

$$U^*(s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]e^{-nTs} . \quad (3.2.3)$$

Можно перейти к Z – преобразованию путем замены $z = e^{Ts}$:

$$Z^* \{u_n(t)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u[nT]z^{-n} \quad (3.2.4)$$

Замена реальных числовых последовательностей последовательностями дельта - импульсов требует соответствующей эквивалентной замены и отдельных функциональных элементов в структурной схеме цифрового регулятора: АЦП, ЦВУ и ЦАП.

Сигнал $u_n(t)$ может быть представлен следующим образом:

$$u_n(t) = u(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

или
$$u_n(t) = u(t) \delta_u(t), \quad (3.2.5)$$

где $\delta_u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$ - последовательность единичных импульсов.

Последняя формула показывает, что последовательность $u_n(t)$ может быть получена в результате модуляции функцией $u(t)$ бесконечной последовательности $\delta_n(t)$. Элемент, осуществляющий такую модуляцию, может быть назван дельта - импульсным модулятором и в дальнейшем будет обозначаться, как указано на рис. 3.2.1.

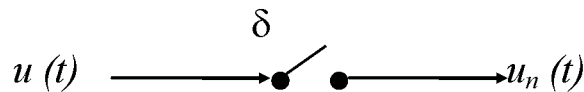


Рисунок 3.2.1 Дельта - импульсный модулятор.

Дискретное Фурье преобразование последовательности $u_n(t)$:

$$U^*(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} U(j\omega - jn\omega_u), \quad (3.2.6)$$

где $\omega_u = 2\pi/T$ - частота импульсной последовательности.

Как видно из (3.2.6), действие дельта - импульсного модулятора сводится к размножению спектра модулирующей функции и переносу его вдоль оси частот на $n2\pi/T$. В результате спектры модулированных последовательностей дельта - импульсов оказываются периодически функциями частоты. Кроме того, если сигнал $u(t)$ обладает ограниченным спектром, т.е. $|U(j\omega)|=0$ при $\omega \geq \omega_m$, то при периоде квантования $T \leq \pi/\omega_m$ ($\omega_m \leq \omega_u$), отдельные составляющие $U^*(j\omega)$ для различных n не накладываются друг на друга и повторяют с точностью до постоянного множителя $1/T$ спектр $U(j\omega)$. Тем самым имеется принципиальная возможность установив идеальный фильтр низких частот отфильтровать составляющие спектра последовательности им-

пульсов $U^*(j\omega)$ для $n \neq 0$ и полностью восстановить непрерывный входной сигнал дельта - импульсного модулятора.

$T \leq \pi/\omega_m$ есть математическая запись теоремы Котельникова, где ω_m - максимальная частота в спектре сигнала.

3.2.2. Преобразование последовательностей дельта-импульсов

Пусть входные и выходные числовые последовательности ЦВУ $\varepsilon[nT]$ и $u(nT)$ заменены дельта - импульсными последовательностями $\varepsilon_n(t)$ и $u_n(t)$. Теперь необходимо заменить ЦВУ некоторой эквивалентной ему непрерывной динамической системой. Эта система, так же как исходная система, должна преобразовать входную последовательность дельта - импульсов в выходную последовательность дельта - импульсов. Если ЦВУ реализует программу вычислений, определяемую разностным уравнением (3.1.1), то соответствующая ему эквивалентная система должна удовлетворять уравнению:

$$a_l u_n(t-lT) + \dots + a_1 u_n(t-T) + a_0 u_n(t) = b_m \varepsilon_n(t-mT) + \dots + b_1 \varepsilon_n(t-T) + b_0 \varepsilon_n(t). \quad (3.2.7)$$

Такие системы преобразования дельта - импульсных последовательностей могут быть реализованы двумя путями:

1) с помощью динамической системы, состоящей лишь из запаздывающих звеньев с временем запаздывания T и безынерционных звеньев; такие системы условно называют непрерывными системами преобразования импульсных последовательностей первого рода;

2) в виде непрерывного сигнала формирующего фильтра со специально подобранным оператором $W(s)$, на выходе которого устанавливается дельта - импульсный модулятор (рис.3.2.1), работающий синхронно с входными импульсами; такие системы условно называют системами второго рода.

Непрерывная система преобразования импульсной последовательности первого рода должна удовлетворять уравнению:

$$a_l u(t-lT) + \dots + a_1 u(t-T) + a_0 u(t) = b_m \varepsilon(t-mT) + \dots + b_1 \varepsilon(t-T) + b_0 \varepsilon(t) \quad (3.2.8)$$

Уравнение (3.2.8) в преобразованиях Лапласа:

$$(a_1 e^{-lTs} + \dots + a_1 e^{-Ts} + a_0)U(s) = (b_m e^{-mTs} + \dots + b_1 e^{-Ts} + b_0)E(s) \quad (3.2.9)$$

или

$$U^*(s) = W^*(s) E^*(s),$$

где

$$W^*(s) = \frac{b_m e^{-mTs} + \dots + b_1 e^{-Ts} + b_0}{a_1 e^{-lTs} + \dots + a_1 e^{-Ts} + a_0} \quad (3.2.10)$$

Оператор e^{-Ts} - есть оператор звена запаздывания с временем запаздывания T . Поэтому динамическая система (3.2.10) является обычной непрерывной системой, состоящей из динамических элементов лишь двух видов: безынерционных и запаздывающих. Характеристики таких систем принято обозначать звездочкой.

В z-преобразованиях (3.2.10) запишется в виде:

или

$$W^*(z) = \frac{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_1 z^{-l} + \dots + a_1 z^{-1} + a_0} \quad (3.2.11)$$

$$W^*(z) = \frac{b_m z^{l-m} + \dots + b_1 z^{l-1} + b_0 z^l}{a_1 + \dots + a_1 z^{l-1} + a_0 z^l} z^{l-m}$$

Частотная характеристика системы является периодической функцией:

$$W^*(j\omega) = W^* \left[j\left(\omega + n \frac{2\pi}{T}\right) \right]; \quad n = \pm 1, \pm 2 \dots$$

Весовая характеристика системы второго рода (рис.3.2.2) представляет собой последовательность дельта - импульсов, модулированную весовой характеристикой формирующего фильтра:

$$w^*(t) = w(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (3.2.12)$$

АФХ формирующего фильтра:

$$W^*(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W(j\omega + jn \frac{2\pi}{T}). \quad (3.2.13)$$

Поэтому динамические характеристики систем второго рода можно определять по таблицам z-преобразования.

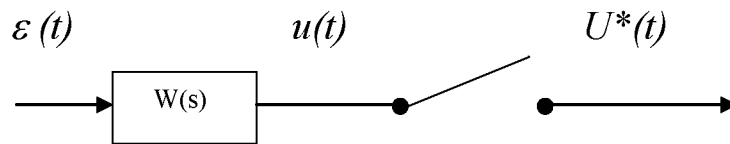


Рисунок 3.2.2

ЦАП в расчетной схеме заменяется демодулятором, осуществляющим преобразование последовательных импульсов в соответствующее непрерывное изменение управляющего воздействия. Условие замены: выходные сигналы ЦАП и демодулятора (ДМ) должны совпадать. В качестве ДМ обычно выбирается "фиксатор нулевого порядка".

Если ЦАП осуществляет линейные операции над входной числовой последовательностью, то он может быть заменен ДМ, который представляет линейную динамическую систему. Весовая функция ДМ $w_\delta(t)$ должна совпадать с реакцией ЦАП на единичное воздействие, т.е.

$$w_\delta(t) = I(t) - I(t - \tau), \tau = \gamma T, \gamma = 1, \text{ т.е. } \tau = T.$$

Передаточная функция ДМ

$$W_\delta(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (3.2.14)$$

зависит как от s , так и от $z = e^{Ts}$.

3.2.3 Расчетная схема цифровых систем

После замены АЦП цифрового регулятора дельта - импульсным модулятором, ЦВУ - фильтром, состоящим из безынерционных и запаздывающих звеньев, ЦАП - демодулятором эквивалентная схема ЦСУ приобретает вид, приведенный на рис. 3.2.3, где приняты следующие обозначения: $W_e^*(z)$ - передаточная функция ЦВУ, $W_\delta(s, z)$ - передаточная функция демодулятора, $W_0(s)$ - передаточная функция объекта управления.

Для дальнейшей работы в приведенной схеме осуществляется объединение операторов, зависящих лишь от z и лишь от s .

$$W_\delta(z, s) = W_e^*(z) * W_\delta(s), \quad (3.2.15)$$

где $W_\delta^*(z)$ - сомножитель, зависящий лишь от z ; $W(s)$ - сомножитель, зависящий лишь от s .

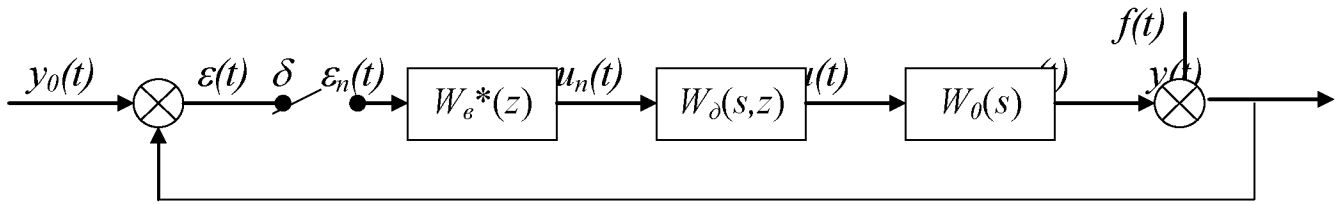


Рисунок 3.2.3.

Принимая во внимание (3.2.15) прямую цепь передачи системы можно описать следующими двумя операторами:

$$W_1^*(z) = W_\epsilon^*(z)W_\delta^*(z), \quad W_2(s) = W_\delta(s)W_0(s), \quad (3.2.16)$$

а систему представить структурной схемой (рис.3.2.4).

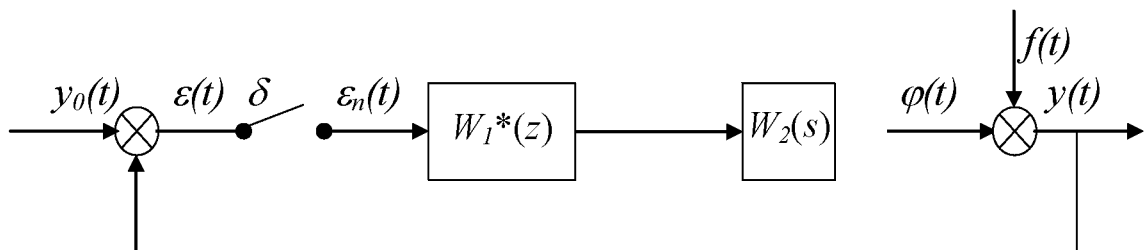
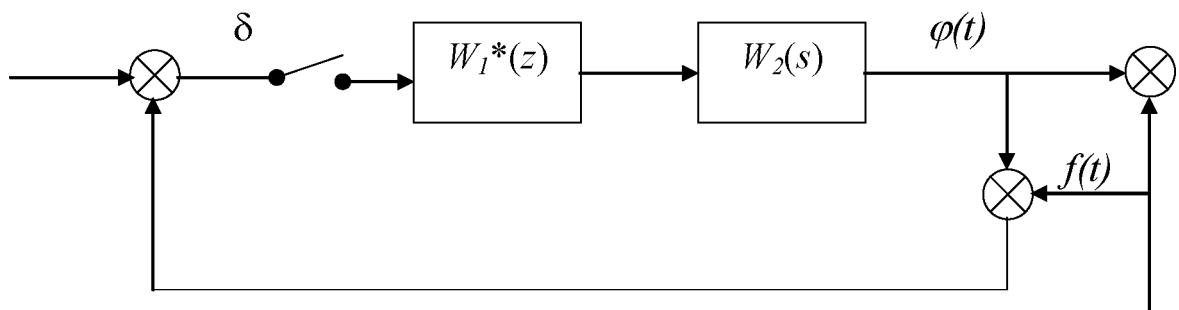


Рисунок 3.2.4.

Дальнейшие структурные преобразования показаны на рис. 3.2.5 и 3.2.6.



$$y(t) = \varphi(t) + f(t)$$

Рисунок 3.2.5.

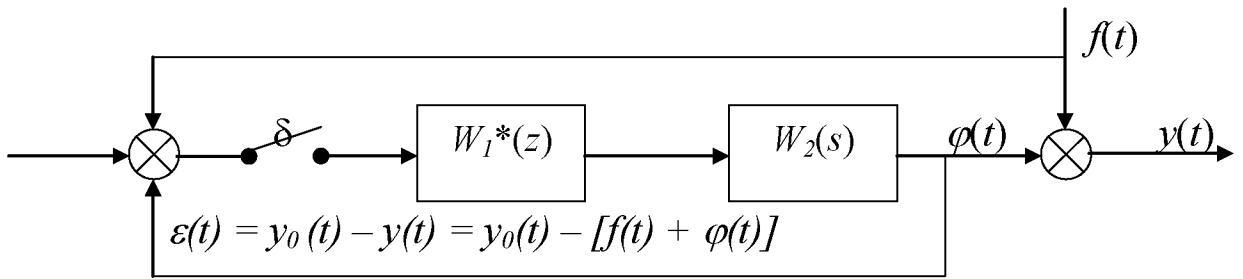


Рисунок 3.2.6.

Последняя структурная схема приводится к виду (рис.3.2.7).

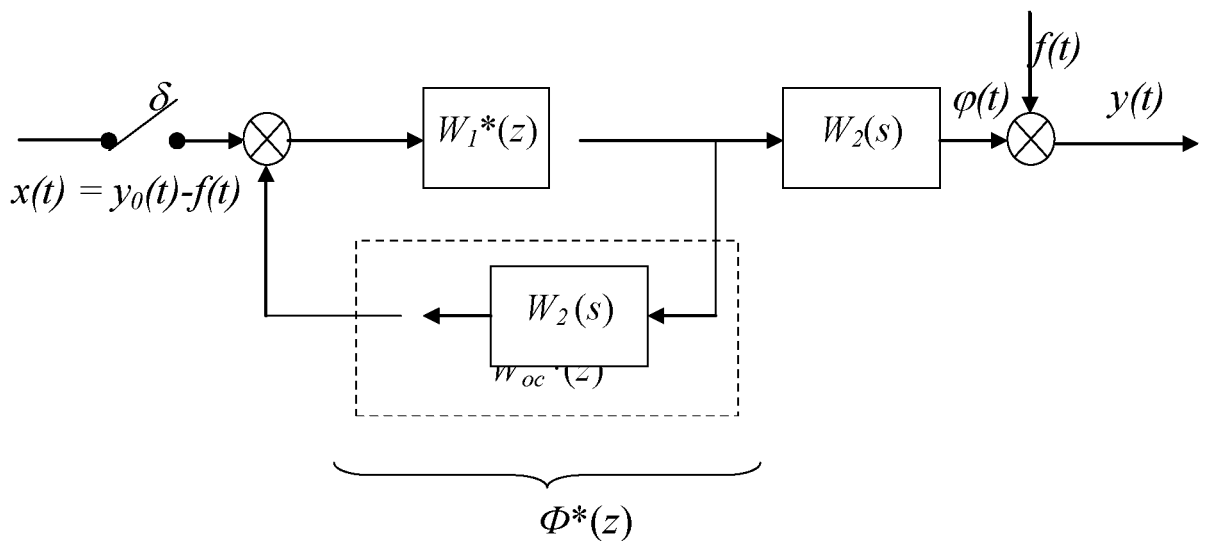


Рисунок 3.2.7.

Передаточная функция замкнутой цифровой системы:

$$\Phi^*(z) = \frac{W_1^*(z)}{1 + W_1^*(z) * W_{oc}^*(z)}, \quad (3.2.17)$$

где $W_{oc}^*(z)$ – дискретная передаточная функция цепи обратной связи, которая по $W_2(s)$ вычисляется по формулам (3.2.12) и (3.2.13).

Расчет оптимальных параметров (настроек) цифрового алгоритма управления может быть выполнен из условия минимума среднеквадратического отклонения (СКО) σ_ε управляемой величины $y(t)$ от задающей $g(t)$:

$$\sigma_\varepsilon = +\sqrt{\sigma_\varepsilon^2}.$$

СКО часто используется в качестве статистического критерия качества и вычисляется согласно соотношению (2.4.5).

Расчет оптимальных параметров цифрового регулятора выполняется в следующей последовательности:

1. По известным передаточным функциям ЦВУ $W_e^*(z)$, ДМ $W_o(z, s)$ и объекта $W_o(s)$ определяются операторы $W_1^*(z)$ и $W_2(s)$.

2. Используя $W_2(s)$ находят дискретную передаточную функцию цепи обратной связи $W_{oc}^*(z)$.

3. По частотной характеристике разомкнутого контура $W_1^*(z) W_{oc}^*(z)$ в пространстве параметров настройки регулятора (сюда входит также параметр T – период квантования в цифровой системе) в обычном порядке определяется граница области допустимого запаса устойчивости САУ.

4. В найденной допустимой области определяется оптимальная точка, которая представляет собой набор оптимальных значений настраиваемых параметров алгоритма управления (регулятора).

3.3. Стандартные дискретные алгоритмы управления

При разработке и применении цифровых САУ возникают две ситуации, связанные с созданием ЦСАУ.

В первом случае цифровые САУ возникают в результате модернизации аналоговой системы, многие элементы которой отслужили свой срок. Реорганизации подвергается прежде всего центральная (управляющая) часть, которая заменяется на УВМ. Соответственно аналоговые математические модели системы и сигналов должны быть преобразованы в цифровую форму. Этот подход особенно плодотворен при использовании параметрически оптимизируемых алгоритмов управления.

К параметрическим оптимизируемым регуляторам относятся широко используемые П -, ПИ -, ПИД - регуляторы, которые также называют промышленными линейными регуляторами. Первоначально предпринимались попытки просто преобразовать их уравнения с помощью дискретизации. Это позволяет использовать накопленный опыт работы с аналоговыми регуляторами и в принципе применять уже хорошо известные правила настройки параметров. Кроме того, отпадает необходимость переподготовки специалистов.

Во втором случае цифровая система возникает в результате со-

здания новой системы из-за того, что один или несколько элементов новой системы являются цифровыми по природе своего устройства. Все модели и сигналы должны быть представлены в цифровой форме вне всякой связи с какими-либо аналоговыми математическими моделями.

3.3.1. Способы дискретизации непрерывных моделей

Существует ряд способов дискретизации уравнений непрерывных регуляторов, которые рассматриваются ниже.

1. При малых тактах квантования разностное уравнение можно получить из дифференциального уравнения путем замены интеграла на сумму, а производной – на разности решетчатых функций. В частности, дифференциалы могут заменяться левыми разностями:

$$\begin{aligned} \frac{df(t)}{dt} &\approx \frac{\Delta f[n]}{T} = \frac{f[n] - f[n-1]}{T} \\ \frac{d^2 f(t)}{dt^2} &\approx \frac{\Delta^2 f[n]}{T^2} = \frac{\Delta f[n] - \Delta f[n-1]}{T^2} \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

2. При малых тактах квантования можно воспользоваться приближенным соотношением, введенным Тастином:

$$s \approx \frac{2z-1}{Tz+1} \quad (3.3.2)$$

Вывод приближенной формулы (3.3.2) основывается на рассмотрении интегрального уравнения

$$y(t) = \frac{1}{T_u} \int_0^t u(t) dt$$

который в изображениях Лапласа имеет вид:

$$Y(s) = \frac{1}{T_u s} U(s) \dots \text{или} \dots \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T_u s}$$

Если идеальный интеграл заменить численной операцией интегрирования по формуле прямоугольников для малых значений T , то:

$$\begin{aligned}
y[n] &\approx \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^n u[i-1], \\
y[n-1] &\approx \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^{n-1} u[i-1], \\
y[n] - y[n-1] &\approx \frac{T}{T_u} u[i-1], \\
Y(z)(1-z^{-1}) &\approx \frac{T}{T_u} u(z)z^{-1}, \\
\frac{Y(z)}{U(z)} &\approx \frac{T}{T_u} \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{T}{T_u} \frac{1}{z-1}
\end{aligned} \tag{3.3.3}$$

Учитывая, что при малых тактах квантования T (3.3.2) и (3.3.3) должны практически совпадать, получаем:

$$s \approx \frac{1}{T}(z-1) \tag{3.3.4}$$

Более точного приближения можно достичь с помощью операции интегрирования по формуле трапеций:

$$\begin{aligned}
y[n] &\approx \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^n \{u[i] + u[i-1]\}, \\
y[n-1] &\approx \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \{u[i] + u[i-1]\}, \\
y[n] - y[n-1] &\approx \frac{T}{2T_u} (u[n] + u[n-1]), \\
\frac{Y(z)}{U(z)} &\approx \frac{T}{2T_u} \frac{z+1}{z-1}
\end{aligned} \tag{3.3.5}$$

Следовательно, при малых T имеет место, приближенное соотношение

$$s \approx \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}. \tag{3.3.6}$$

Этот же результат можно получить, ограничиваясь первым членом разложения в ряд функции $z = e^{Ts}$:

$$s = \frac{1}{T} \ln z \approx \frac{2}{T} \left(\frac{z-1}{z+1} + \frac{(z-1)^3}{3(z+1)^3} + \dots \right). \tag{3.3.7}$$

3. При больших тактах квантования обычно пользуются таблицами z -преобразований. Исходной информацией служит либо весовая функция $\omega(t)$, либо передаточная функция $W(s)$. По ним в табл. z -преобразований отыскивается требуемая передаточная функция $W(z)$.

Передаточная функция объектов высокого порядка предварительно раскладывается в Σ дробно-рациональных членов.

3.3.2. Дискретное представление непрерывных ПИД - алгоритмов при малом такте квантования

Идеализированное уравнение непрерывного ПИД-регулятора



$$u(t) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) . \quad (3.3.7)$$

При малом такте квантования T (3.3.7) можно преобразовать в разностное уравнение, заменив 1-производную 1-разностью, а интеграл - суммой. Непрерывное интегрирование может быть заменено интегрированием по методу прямоугольников или трапеций. При использовании метода прямоугольников (3.3.7) принимает вид

$$u[n] = k_p \left\{ \varepsilon[n] + \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^n \varepsilon[i-1] + \frac{T_d}{T} (\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1]) \right\} . \quad (3.3.8)$$

Для программирования на ЭВМ более удобны рекуррентные алгоритмы, когда для вычисления $u[n]$ используется ее предыдущее значение $u[n-1]$ и поправочный член. Для этого запишем (3.3.8) для $u[n-1]$:

$$u[n-1] = k_p \left\{ \varepsilon[n-1] + \frac{T}{T_u} \sum_{i=0}^n \varepsilon[i-2] + \frac{T_d}{T} (\varepsilon[n-1] - \varepsilon[n-2]) \right\} \quad (3.3.9)$$

Вычтем (3.3.9) из (3.3.8)

$$u[n] - u[n-1] = q_0 \varepsilon[n] + q_1 [n-1] + q_2 [n-2] \quad (3.3.10)$$

где

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T_\delta}{T}\right);$$

$$q_1 = -k_p \left(1 + 2\frac{T_\delta}{T} - \frac{T}{T_u}\right);$$

$$q_2 = k_p \frac{T_\delta}{T}$$

Теперь вычисляется только первая разность управляющей переменной $\Delta U[n] = u[n] - u[n-1]$, поэтому алгоритм называется скоростным. Используя для аппроксимации интеграла метод трапеций на основании (3.3.7) можно получить:

$$u[n] = K_p [\varepsilon[n] + T/T_u (\varepsilon[0] + \varepsilon[n]/2 + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon[i]) + T_\delta/T (\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1])]. \quad (3.3.11)$$

Вычитая из (3.3.11) $u[n-1]$ можно получить другое рекуррентное выражение, описывающее дискретный ПИД закон управления:

$$u[n] = u[n-1] + a_0 \varepsilon[n] + a_1 \varepsilon[n-1] + a_2 \varepsilon[n-2],$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= k_p (1 + T/2T_u + T_\delta/T); \\ a_1 &= k_p (1 + 2T_\delta/T - T/2T_u); \\ a_2 &= k_p (T_\delta/T) \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

Для малых тактов квантования T параметры a_0, a_1, a_2 можно вычислить, используя параметры k_p, T_u, T_δ аналогового ПИД-регулятора в соответствии с соотношениями (3.3.10), (3.3.12).

3.3.3. Модификация дискретных алгоритмов управления

Обычный алгоритм:

$$\begin{aligned} \Delta u[n] &= q_0 \varepsilon[n] + q_1 \varepsilon[n-1] + q_2 \varepsilon[n-2] && \text{или} \\ \Delta u[n] &= k_p \left\{ \varepsilon[n] - \varepsilon[n-1] + \frac{T_d}{T} \varepsilon[n-1] - \frac{T_d}{T} \varepsilon[n-2] + \varepsilon[n-2] \right\} \end{aligned} \quad (3.3.13)$$

Известно большое число модификаций дискретных алгоритмов управления, основанных на дискретизации дифференциальных уравнений непрерывных ПИД-регуляторов. Некоторые из этих модификаций будут рассмотрены ниже.

Рассматриваемая модификация преследует цели:

а) уменьшение изменений управляющей переменной $u(t)$ при резких изменениях задающей $u(t)$ при резких изменениях задающего воздействия $g(t)$: его исключают из дифференцирующего члена, т.е.

заменяют $\varepsilon[n] = g[n] - e[n]$:

$$\begin{aligned} & \frac{T_o}{T} (\varepsilon[n] - 2\varepsilon[n-1] + \varepsilon[n-2]) = \\ & \frac{T_o}{T} \{g[n] - y[n] - 2(g[n-1] - y[n-1]) + g[n-2] - y[n-2]\} = \quad (3.3.14) \\ & = \frac{T_o}{T} (-y[n] + 2y[n-1] - y[n-2]), \end{aligned}$$

т.к. $g[n] = g[n-1] = g[n-2]$ при ступенчатом задающем воздействии;

б) дополнительное уменьшение изменения $u(t)$, оставлением $g(t)$ только в интегрирующем слагаемом:

$$\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1] = g[n] - y[n] - g[n-1] + y[n-1] = y[n-1] - y[n]; \quad (3.3.15)$$

в) замена $\varepsilon[n-1]$ на более предпочтительное $\varepsilon[n]$ в интегрирующем слагаемом: После небольшой модификации способа интегрирования в уравнении (3.3.13) под знаком суммы можно использовать значения $\varepsilon[n-1]$ вместо $\varepsilon[n]$. При этом коэффициенты a_0 и a_1 изменятся и не будут соответствовать коэффициентам, полученным для больших тактов квантования.

Таким образом, модифицированный алгоритм имеет вид:

$$\Delta u[n] = k_p \{y[n-1] - y[n] + \frac{T}{T_u} (g[n] - y[n] + \frac{T_o}{T} (-y[n] + 2y[n-1] - y[n-2]))\} \quad (3.3.16)$$

Алгоритм менее чувствителен к высокочастотным составляющим сигнала $g[n]$ по сравнению с сигналом $y[n]$. Поэтому параметры регулятора, полученных в результате оптимизации для определения типов возмущений, например, для возмущений на входе ОУ и входе системы, будут отличаться незначительно.

Существенные изменения управляющей переменной могут, также уменьшены путем ограничения скорости изменения задающей и (или) управляющей переменной. Поскольку такие ограничения оказываются эффективными для всех типов возмущений, их применение предпочтительнее использования модифицированных алгоритмов управления (3.3.14) и (3.3.16).

Другие модификации алгоритмов управления состоят в различных способах реализации дифференцирующей части. Часто регулируемая переменная содержит высокочастотный шум, который не измеряется, что приводит к нежелательным существенным колебаниям управляющей координаты. Введение дифференцирующего члена в алгоритм управления часто может быть необходимым для улучшения качества процессов управления при наличии среднечастотных шумов

не слишком большого уровня, поскольку в этом случае происходит приближенное сокращение полюсов объекта, что приводит к расширению областей устойчивости и возможности увеличения коэффициента передачи. Возможности улучшения работы системы управления связаны также с осуществлением фильтрации регулируемой переменной $y[n]$ с помощью фильтров, включаемых в систему перед алгоритмом управления и поэтому влияющих на все его компоненты.

3.4. Параметрически оптимизируемые дискретные алгоритмы управления низкого порядка

Не всегда можно говорить о связи между дискретными и непрерывными математическими моделями. Довольно часто разработчики САУ вводят в рассмотрение дискретные модели регуляторов без привязки к определенным непрерывным математическим моделям. Это объясняется следующими причинами.

При больших тактах квантования T возможным способом дискретизации непрерывных математических моделей является непосредственное z – преобразование, которое становится невозможным при наличии дифференцирующих членов в модели.

Необходимость преобразования непрерывных математических моделей в цифровую форму отпадает и в том случае, когда САУ изначально создается с цифровым устройством управления и обработки информации.

Рассмотрим САУ с простым контуром управления (рис.3.4.1),

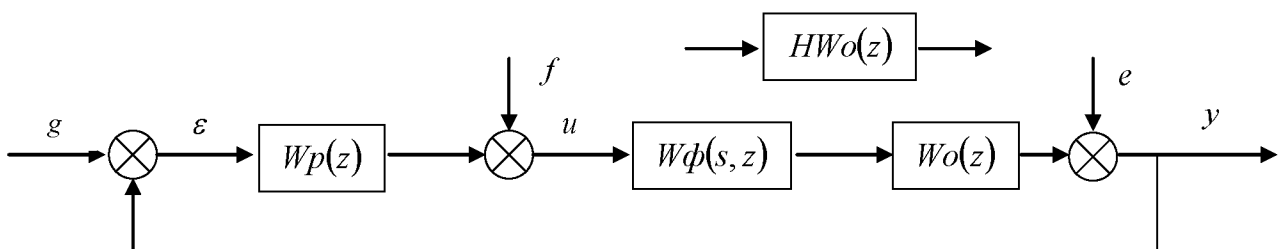


Рисунок 3.4.1 Одноконтурная САУ.

где $H(s) = \frac{1}{s} [1 - e^{-Ts}]$ или $H(s, z) = \frac{1}{s} * \frac{z-1}{z}$ - передаточная функция экстрополятора нулевого порядка (фиксатора). Дискретная передаточная функция объекта управления $W_o(s)$ с фиксатором имеет вид:

$$W_o(z) * W_\phi(s, z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d}. \quad (3.4.1)$$

Обобщенная дискретная передаточная функция линейного регулятора $W_p(s)$ может быть записана как

$$W_p(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_\nu z^{-\nu}}{p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_\mu z^{-\mu}}. \quad (3.4.2)$$

Алгоритм (3.4.2) может быть реализован, если, $p_0 \neq 0$, однако, соотношение порядков числителя и знаменателя может быть различным: $\nu \leq \mu$ или $\nu > \mu$. Обычно $p_0 \neq 0$, и $p_0 = 1$.

В структурно оптимизируемых регуляторах μ и ν являются функции соответствующих порядков модели объекта. Например, для апериодических регуляторов $\nu = m, \mu = m + d$. В параметрически оптимизируемых регуляторах порядок регулятора может быть меньше порядка модели объекта, $\nu \leq m, \mu \leq m + d$. Следовательно параметрические оптимизируемые регуляторы (ПОР) требуют меньших затрат машинного времени при проектировании и эксплуатации.

При выборе структуры ПОР обычно необходимо гарантировать, чтобы изменение задающей переменной $g[k]$, возмущений $f[k]$ не приводили к появлению статической ошибки по сигналу $\varepsilon[k]$. На основании теоремы z -преобразования о конечном значении для выполнения этого условия необходимо, чтобы передаточная функция регулятора имела полюс $z = 1$. Следовательно, простейшие алгоритмы управления ν -порядка будут иметь следующую структуру

$$W_p(z) = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_\nu z^{-\nu}}{1 - z^{-1}}. \quad (3.4.3)$$

Из алгоритма (3.1.3) при $\nu = 1$ и соответствующем выборе параметров получается регулятор типа ПИ, при $\nu = 2$ - типа ПИД, при $\nu = 3$ - ПИД₂ и т.д.

Передаточная функция (3.1.3) соответствует разностному уравнению

$$u[k] = u[k-1] + q_0 \varepsilon[k] + q_1 \varepsilon[k-1] + \dots + q_\nu \varepsilon[k-\nu] \quad (3.4.4)$$

Для получения хорошего качества процесса управления параметры (3.1.4) должны выбираться с учетом характеристик объекта.

Расчет параметров может быть выполнен следующим образом:

а) в результате параметрической оптимизации критерия качества; аналитическое решение возможно лишь для объектов и регулирования очень низкого порядка;

б) на основе алгоритмов параметрической настройки: в этом случае необходимо оценивать либо параметры переходного процесса при ступенчатом задающем воздействии, либо критическое значение коэффициента передачи и период колебаний на границе установившейся системы;

в) методом проб и ошибок: последовательно увеличивать параметры от малых значений до тех пор, пока процесс в замкнутой САУ не приобретет значительной колебательности. После этого понемногу следует уменьшать значения параметров;

Для упрощения процессов настройки регуляторов и более наглядного сравнения различных систем управления часто используют ступенчатое изменение возмущений и задающего сигнала.

Алгоритмы управления второго порядка. Приняв $\nu = 2$ в (3.4.3) получим

$$Wp(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (3.4.5)$$

На основании (3.4)

$$u[k] = u[k-1] + q_0 \varepsilon[k] + q_1 \varepsilon[k-1] + q_2 \varepsilon[k-2] \quad (3.4.6)$$

Предполагая, что

$$\varepsilon[k] = 1[k] = \begin{cases} 1 & \text{для } k \geq 0; \\ 0 & \text{для } k < 0, \end{cases}$$

запишем систему уравнений для последовательных значений выходного сигнала регулятора, которая следует из (3.4.6). Когда $u[1] < u[0]$, дискретный регулятор соответствует непрерывному ПИД-регулятору с дополнительной задержкой сигнала на один такт. Если параметр $q_0 > 0$, то имеют место следующие соотношения для параметров q_0, q_1, q_2 :

при $u[k] < u[0]$: $q_0 + q_1 < 0$ или $q_1 < -q_0$;

при $u[k] > u[k-1]$ для $k \geq 2$: $q_0 + q_1 + q_2 > 0$ или $q_2 > -(q_1 + q_0)$.

Для положительного коэффициента передачи регулятора выполняется условие $q_0 > q_2$ (см. 3.4.7). Таким образом, обобщая допустимые диапазоны изменения параметров регулятора, получим:

$$q_0 > 0; q_1 < -q_0; -(q_0 + q_1) < q_2 < q_0 \quad (3.4.7)$$

Реакция регулятора на ступенчатое единичное воздействие показана на рис. 3.4.2, 3.4.3.

Свойства регулятора характеризуются следующими коэффициентами:

$k = q_0 - q_2$ – коэффициент передачи;

$Cg = q_2/k$ – коэффициентом опережения;

$C_u(q_0 + q_1 + q_2)/k$ – коэффициент интегрирования.

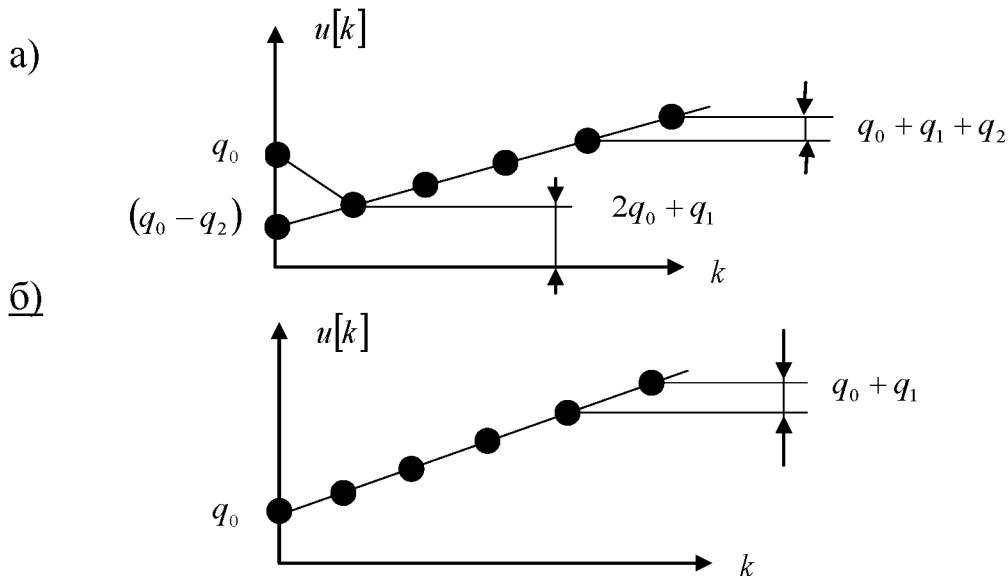


Рисунок 3.4.2 Переходные процессы: а) для ПИД – алгоритма второго порядка; б) для ПИ – алгоритма первого порядка.

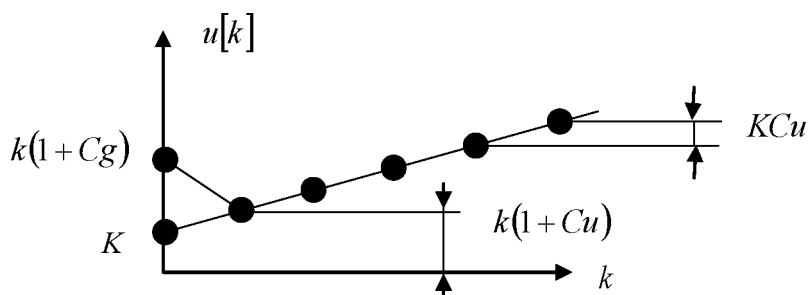


Рисунок 3.4.3 Переходный процесс для алгоритма управления второго порядка.

Коэффициенты (3.4.5) при малых тактах квантования связаны с соответствующими коэффициентами непрерывных ПИД-алгоритмов (3.3.10) следующими соотношениями:

$$k_p = k; \quad C_o = T_o/T; \quad C_u = T/T_u.$$

С учетом условий (3.4.7) получим:

$$C_o > 0; \quad C_u > 0; \quad C_u < C_o. \quad (3.4.8)$$

Передаточная функция дискретного регулятора после подстановки коэффициентов k, C_o, C_u в (5.9) примет вид:

$$W_p(z) = \frac{k[(1 + C_\delta) + (C_u - 2C_\delta - 1)z^{-1} + C_\delta z^{-2}]}{(1 - z^{-1})} \quad (3.4.9)$$

Рассмотренный выше алгоритм управления 2-порядка является аналогом непрерывного ПИД-регулятора с положительными параметрами только в том случае, если выполняются условия (3.4.7) или (3.4.9). В общем случае параметры регулятора, определенные в результате оптимизации, могут и не удовлетворять этим условиям, что зависит от характеристик конкретного объекта управления, вида критерия оптимизации и возмущающего сигнала.

Алгоритмы управления первого порядка. В (3.4.5) приняв $q_2 = 0$, можно получить передаточную функцию.

$$W_p(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (3.4.10)$$

которой соответствует разностное уравнение

$$u[k] = u[k-1] + q_0 \varepsilon[k] + q_1 \varepsilon[k-1]$$

Реакция регулятора на ступенчатое единичное входное воздействие определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} u[0] &= q_0; \\ u[1] &= u[0] + q_0 + q_1 = 2q_0 + q_1; \\ u[2] &= u[1] + q_0 + q_1 = 3q_0 + 2q_1; \\ &\text{-----} \\ u[k] &= u[k-1] + q_0 + q_1 = (k+1)q_0 + kq_1. \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

При $u[1] > u[0]$ алгоритм управления первого порядка аналогичен непрерывному ПИ – алгоритму без дополнительной задержки. Если $q_0 + q_1 > 0$ или $q_1 > -q_0$.

Реакция регулятора первого порядка на единичный ступенчатый сигнал показана на рис.5.2 (б). По аналогии с (5.12) можно определить следующие параметры алгоритма:

$$\begin{aligned} k &= q_0 - \text{коэффициента передачи}; \\ C_u &= (q_0 + q_1)/k - \text{коэффициенты интегрирования.} \end{aligned} \quad (3.4.12)$$

Для ПИ – алгоритма с положительными коэффициентами $C_u > 0$.

Подставляя введенные коэффициенты (3.4.12) в передаточную функцию (3.4.10) получим:

$$W_p(z) = \frac{k[1 + (C_u - 1)z^{-1}]}{1 - z^{-1}}. \quad (3.4.13)$$

Если параметр q_0 выбран равным нулю, то будет получен регулятор интегрирующего типа с передаточной функцией

$$W_p(z) = \frac{q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.4.14)$$

с разностным уравнением

$$u[k] = u[k-1] + q_1 \varepsilon[k-1].$$

Другими частными случаями являются регулятор пропорционального типа с передаточной функцией

$$W_p(z) = q_0 \text{ или } u[k] = q_0 \varepsilon[k], \quad (3.4.15)$$

получаемый из (3.4.13) при $C_u = 0$, и регулятор пропорционально-дифференциального типа с передаточной функцией

$$\left. \begin{aligned} W_p(z) &= q_0 - q_2 z^{-1} \\ u[k] &= q_0 \varepsilon[k] - q_2 \varepsilon[k-1] \end{aligned} \right\} \quad (3.4.16)$$

полученный из (3.4.13) при $C_u = 0$.

Алгоритмы управления с заданными начальными условиями. Передаточная функция замкнутой САУ, описывающая связь между задающей g и управляющей переменной u , записывается следующим образом:

$$\frac{U(z)}{G(z)} = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)W_0(z)} \quad (3.4.17)$$

Допуская, что передаточная функция объекта управления имеет вид (3.4.1), а регулятора второго порядка – (3.4.5) и $b_0 = 0$, можно получить следующие первые два значения управляющей переменной при подаче на вход системы ступенчатого задающего воздействия $g[n] = 1[n]$:

$$\text{а) при } d = 0; \quad \begin{aligned} u[0] &= q_0 \\ u[1] &= q_0(2 - q_0 b_1) + q_1 \end{aligned} \quad (3.4.18)$$

$$\text{б) при } d \geq 0; \quad u[0] = q_0, \quad u[1] = 2q_0 + q_1 \quad (3.4.19)$$

Как видно из последних соотношений, величина $U[0]$ при ступенчатом изменении входного сигнала определяется только значением параметра q_0 и не зависит от постоянного запаздывания d . Поэтому, для задания начального значения управления переменной и достаточно зафиксировать параметр q_0 регулятора.

Отмеченное выше обстоятельство может быть использовано в процессе проектирования регулятора для задания допустимого диапазона изменения управляющей переменной. Для этого необходимо выбрать рабочую точку контура управления и задать максимальное приращение сигнала $U[0]$ на входе ОУ при ступенчатом изменении на величину g_0 задающей переменной $g[n]$ (или ошибки $\varepsilon[n]$) и после этого принять $q_0 = U[0]/g_0$. Из уравнений (5.23), (5.24) следует, что условие $U[1] \leq U[0]$ выполняются, когда

$$\text{а) при } d = 0 \quad q_1 \leq -q_0(1 - q_1 b_1);$$

$$\text{в) при } d \geq 1 \quad q_1 \leq -q_0.$$

Неравенства справедливы и для регуляторов первого порядка. Если задано достаточно малое значение $U[0]$ и в результате система становится сильно задемпфированной, то в квадратичном критерии оптимизации можно задать $r = 0$. Если g_0 определено на основании ограничений, наложенных на $U[0]$, то в регуляторе второго порядка могут быть оптимизированы только два параметра, а в регуляторе первого порядка только один, тем самым, уменьшая объем вычислений.

3.5. Параметрическая оптимизация цифровых САУ

В цифровых системах управления всегда имеется на один больше настраиваемых параметров, чем в соответствующих непрерывных системах управления. Это связано с тем, что в цифровых системах управления такт квантования T также является настраиваемым (оптимизируемым) параметром.

Выбор такта квантования. Как хорошо известно, дискретные регуляторы теоретически обладают худшими качественными характеристиками, чем непрерывные. Это объясняется тем, что дискретные выборки сигналов содержат меньше информации, чем непрерывные сигналы, т. е. при квантовании происходит потеря точности информации. Однако на практике характеристики цифровых регуляторов всегда выше, чем у аналоговых регуляторов. Свойства цифровых регуляторов во многом зависят и от такта квантования и поэтому выбор оптимального значения такта квантования имеет важное значение. На качество системы влияние оказывает также частотный спектр возмущающих сигналов. Для параметрически оптимизируемых регуляторов принято считать, что качество ухудшается с ростом величины

такта квантования. В целом проблема выбора такта квантования T является противоречивой и связана с рядом факторов:

- требуемое качество управления;
- динамика объекта;
- спектры возмущений;
- исполнительное устройство и его привод;
- измерительные приборы;
- требование оператора;
- вычислительные затраты или стоимость одного контура управления;
- модель объекта управления.

Рассмотрим влияние этих факторов. Если необходимо обеспечить только требуемое качество процессов, то T может быть выбран большим, чем тот, который обеспечивает наилучшую аппроксимацию непрерывного контура управления.

Влияние спектра возмущающих сигналов. Известно, что для контура управления можно выделить три области частот: низкочастотная ($0 \leq \omega \leq \omega_1$)- возмущение управляющей переменной подавляются; среднечастотная ($\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$)- возмущения усиливаются; среднечастотная ($\omega_1 < \omega \leq \omega_2$)- возмущения усиливаются; высокочастотная ($\omega_2 < \omega < \infty$)- контур управления не оказывает действия (влияния) на возмущение.

Обычно контуры управления проектируют таким образом, чтобы их среднечастотная область охватывала такой диапазон частот, в котором амплитуда возмущающих действий была незначительной. Кроме того, возмущения высокой и средней частоты необходимо подвергать фильтрации, чтобы исключить нежелательные отклонение управляющей переменной. Если возмущение вплоть до частоты $\omega_{\max} = \omega_1$ необходимо обрабатывать как и в непрерывной системе, T должен выбираться на основании теоремы Шеннона.

Это же соотношение можно использовать, когда известно собственная частота системы ω_{\max} . Это будет максимальной частотой, которую дискретный регулятор пропускает без искажений.

Если исполнительное устройство обладает значительной инерционностью, то в общем случае не следует выбирать слишком малый такт квантования, т.к. может оказаться, что к моменту прихода очередного сигнала управления предыдущей еще не отработан.

Если в системе используются измерительные приборы, выдающие сигнал дискретно, как пример, в химических анализаторах или во

вращающихся антеннах радиолокатора, то параметр T дискретного регулятора оказывается заданным.

Оператору желательно иметь быстрый отклик управляющей переменной на ступенчатое изменение задающего сигнала в произвольный момент времени, поэтому такт квантования не должен превышать нескольких секунд.

Для минимизации вычислительных затрат или стоимости каждого контура управления такт квантования следует брать как можно большим.

Из сказанного следует, что такт квантования нужно выбирать, исходя из большого числа требований, часть из которых оказывается противоречивыми. Поэтому в каждом конкретном случае приходится принимать компромиссное решение. Для упрощения структуры, но часто приходится выбирать один и тот же такт квантования в различных контурах системы управления.

Заметим, что рекомендации табл. 3.6.1. часто проводят к заданию слишком малых значений тактов квантования. Для обеспечения хорошего качества управления вполне достаточно, по крайней мере для низкочастотных объектов, иметь от 6 до 15 выборок за время t_p (время достижения 95% установившегося значения). Практические рекомендации по выбору такта квантования для низкочастотных объектов, основанные на аппроксимации характеристик непрерывного контура управления приведены в табл. 3.6.1.

Табл. 3.6.1. показывает существенное влияние на выбор такта квантования динамики объекта: T_τ , τ и т.д.. Чем больше постоянная времени, тем больше такт квантования.

Параметрическая оптимизация цифровых САУ. Для настройки непрерывных ПИД-регуляторов часто используют т. н. «правила настройки». Эти правила предназначены для низкочастотных объектов и основаны на определении пределов устойчивости системы с П - регулятором или использовании постоянных времени объекта управления. Обзор таких правил содержится в работе: Oppelt W. Kleines Handbuch Technischer Regelvorgange. - Weinheim: Verlag Chemic, 1960. В частности хорошо известны правила Циглера и Никольса.

Рассмотрим возможность модификации правил настройки для дискретных ПИД-регуляторов. Известны соотношения для расчета параметров регулятора, предназначенного для управления объектами с передаточной функцией

$$W_o(s) = [1/(1 + T_o s)] e^{-\tau_o s}.$$

Таблица 3.6.1.

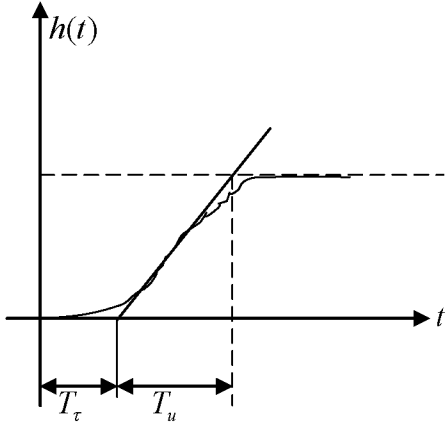
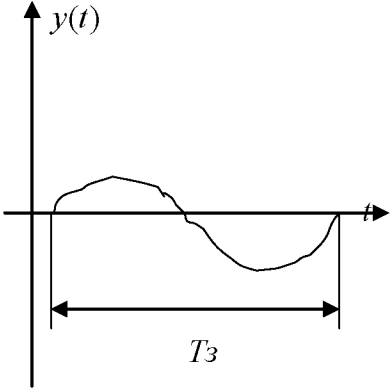
Критерии определения такта квантования	Величина такта квантования	Замечания
Качество процессов	$T \approx (1/8 \div 1/16) * (1/f)$ $T \approx (1/4 \div 1/8) * \tau$	ОУ с преобладающим временем запаздывания
Время установления больше на 15%, чем для непрерывного ПИ-регулятора	$T \approx (1.2 \div 0.35) T \tau$ $T \approx (0.22 \div 0.35) T \tau$	$0.1 \leq Tu/T \leq 1.0$ $1.0 \leq Tu/T \leq 10$
Компенсация возмущений до частоты ω_{\max} как в непрерывном контуре	$T = \pi / \omega_{\max}$	Условие выбора $ W(\omega_{\max}) = 0.01 \div 0.1$
По результатам моделирования	$T \approx (1/6 \div 1/15) t_p$	
Идентификация модели объекта	$T \approx (1/6 \div 1/12) t_p$	

Примечание: τ - время запаздывания; f - собственная частота замкнутой системы [1/с]; t_p – время регулирования (время достижения 95% установившегося значения; T_τ время задержки (см. табл. 3.6.2).

На основании соотношений для непрерывных регуляторов можно получить параметры дискретных регуляторов, если вместо чистого запаздывания τ подставить величину $(\tau + T_o/2)$, где $T_o/2$ - аппроксимированное время задержки, обусловленное процедурами квантования и фиксации сигналов.

В табл. 3.6.2. сведены правила настройки У. Такахаши и С. С. Чен по критерию Циглера-Никольса, основанные на определении характеристик переходного процесса или пределов устойчивости, для модифицированных алгоритмов управления вида (3.3.16).

Таблица 3.6.2.

	k_p	T_o/T_δ	T_δ/T_o	k_p	T_o/T_u	T_δ/T_o
П	$T_u/(T_\tau + T_o)$	-	-	$k_{pкк} / 2$	-	-
ПИ	$0.9T_u/(T_\tau + T_o/2) - 0.135 T_u T_o / (T_\tau + T_o/2)^2$	$0.27T_u T_o / \kappa_p (T_\tau + T_o/2)^2$	-	$(0.45\kappa_{pкк} \div 0.27\kappa_{pкк}) T_o / T_3$ меньшее значения для $T_o \approx 4T_\tau$	$0.54^* \kappa_{pкк} T_o / \kappa_p T_3$	-
ПИД	$1.2T_u/(T_\tau + T_o) - 0.3 T_u T_o / (T_\tau + T_o/2)^2$	$0.6T_u T_o / \kappa_p (T_\tau + T_o/2)^2$	$0.5T_u / \kappa_p T_o$	$(0.6\kappa_{pкк} \div 0.4\kappa_{pкк}) T_o / T_3$ справедливо для $T_u \leq 2T_\tau$, не рекомендуется для $T_o \approx 4T_\tau$	$1,2\kappa_{pкк} T_o / \kappa_p T_3 / 40$ не рекомендуется для $T_o \approx 4T_\tau$	$T_3/40$ $\kappa_{pкк} T_3 / \kappa_p T_o$
Не применимо для $T_\tau/T_o \rightarrow 0$						
						
	Измерение параметров процесса			Измерение параметров колебаний		

4 ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ САУ

4.1 САУ с управляющими ЭВМ

Шестидесятые годы 20-го столетия положили начало активной разработке систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства, управления производством, автоматизации производственных процессов и управления качеством [10, 12,16-28]. Этому способствовало появление достаточно мощных по тем временам ЭВЦМ второго поколения, элементной базой которых служили дискретные полупроводниковые и магнитные компоненты. Очередной качественный скачок в развитии средств вычислительной техники (СВТ) наступил с изготовлением в 1971 г. первого микропроцессора. Массовый выпуск микропроцессорных комплектов обусловил широкое применение микроЭВМ также в сфере управления производством и технологическими процессами.

Возможны два принципиально отличных друг от друга подхода к построению программируемой цифровой системы управления и контроля объектов управления (ОУ) [29,66,67].

Первый подход основан на применении универсального персонального компьютера, который не приспособлен для непосредственной связи с элементами автоматики.

Второй из подходов предполагает автоматизацию с помощью управляющих микроЭВМ. Термин управляющие вычислительные машины (УВМ) в настоящее время заменяет термин промышленный (индустриальный) компьютер. Программируемый промышленный компьютер (ППК) является одним из классов микроЭВМ, который ориентирован на автоматизацию ОУ. Одним из разновидностей ППК являются программируемые логические контроллеры (ПЛК). Основное отличие ППК от ПЛК состоит в том, что ППК, как правило, является центральной частью системы автоматизации (СА) и устанавливается в центральном пункте управления, тогда как ПЛК – в непосредственной близости от ОУ.

Применение ПЛК предпочтительнее с позиции технологии организации системы автоматизации, а применение универсальной ПЭВМ – с позиции стоимости разработки эксплуатации.

Существует множество производственных факторов, от воздействия которых ПЛК не могут быть защищены традиционными методами защиты СВТ, однако ПЛК должны и в этих условиях функционировать нормально. Кроме того, отпечаток на конструктивное ис-

полнение ПЛК накладывает тот фактор, что в «общении» с ПЛК принимают непосредственное участие операторы технологического процесса. Поэтому ПЛК конструктивно выполняют в жестких механических частично или полностью защищенных корпусах, в которых при необходимости создается микроклимат.

4.1.1 Аппаратурная организация ПЛК

ПЛК представляет собой гибкое, специализированное для связи с реальными техническими элементами автоматики устройство. Гибкость ПЛК обеспечивается модульным принципом построения и свойством программируемости. Как правило, предусматриваются модули питания, постоянной памяти(ПП), оперативной памяти(ОП), ввода-вывода(ВВ), отображения, организации связи с удаленными объектами и между ПЛК. Количество однотипных модулей определяется объемом и сложностью решаемой задачи автоматизации и может наращиваться по мере необходимости. ПЛК имеют мощное специализированное программное обеспечение. Программирование ПЛК возможно либо с помощью автономных пультов программирования, либо с помощью персонального компьютера.

Производство ПЛК осуществляется известными в мире компаниями как Schneider Automation GmbH, Siemens, Intel, Allen-Bradley, Bernecker & Rainer, Wickman, Reliance Electric и др.[68-70].

Ниже рассматриваются характеристики основной продукции двух компаний: Schneider Automation GmbH (с недавних времен Integrated Control Technology GmbH, Германия) и Bernecke & Rainer Industrie-Elektronik GmbH (Австрия).

Компания ICT выпускает три семейства ПЛК: Micro, 984-A120 Compact, 984. Очередное поколение продукции ICT известны под названием «Quantum» и «Momentum». К ПЛК этой компании относятся модели 984х-008, 984А-xxx, 984В-xxx, 0984-AT2, 0984-AT4, 0984-MCO, 0984-VMO, 0984-VM4.

Первое поколение продукции компании В&R представлено ПЛК Compact, Minicontrol, M-264, Midicontrol, Multicontrol, ПЛК Maestro. Обновленное поколение I продукции В&R состоит из ПЛК System 2003, System 2005, System 2010, ПЛК Provitl 2000, Provit-4000, Provit-5000.

ПЛК Micro и Compact предназначены для СА небольшой информационной мощности (табл. 4.1.1), хотя на их базе возможна ор-

ганизация многоуровневых систем. ПЛК Micro и Compact имеют центральный процессор(ЦП), ОП и 1111, фиксированный набор устройств ВВ, которые в отличие от других ПЛК встроены в один и тот же корпус. Это обеспечивает малые размеры, небольшой вес, дешевизну и отказ от дополнительных устройств во многих задачах автоматизации. Благодаря литиевому аккумулятору данные в ОП сохраняются в течении года после обесточивания ПЖ. ПЛК Micro имеет габариты 254x127x76.2 мм, а Compact - 285x124x42 мм.

Применение Micro и Compact для сложных ОУ обеспечивается тем, что как головное устройство они могут объединять и координировать работу нескольких себе подобных ПЛК. К примеру, ПЛК Micro 612 может, как головное устройство, управлять четырьмя другими ПЛК и устройствами ВВ А120. В таком варианте количество входов составляет: аналоговых - 320, дискретных - 1280; выходов: аналоговых - 160, дискретных - 1260.

Таблица 4.1.1. Технические характеристики ПЛК Micro и Compact

Тип ПЛК	Память		Аналог вх/вых	Дискр. вх/вых	Рег-ы	Быстро- действ. мс/Кс	Кол. ин- терф связи	Сеть
	дан-х	польз.						
Семейство ПЛК Micro								
110CPU31 1	400с	1Кс	-	28	400	5	2	6
110CPU41 1	400с	1Кс	-	28	400	4,25	2	6
110CPU51 2	1920с	2Кс	-	28	1820	2,5	3	6
110CPU61 2	1920с	8Кс	4	28	1920	2,5	3	6
Compact	16Кс	16 К с	4	30	8168	4	5	1

Примечание: В таблицах 1-4 использованы следующие условные обозначения сетей: 1- Mimnet, 2-Multinet, 3- Archnet, 4- Eternet, 5- Profibus, 6- Modbus

ПЛК 984-А120 Compact1(табл. 4.1.2) имеет модульную структуру и возможности большого ПЛК, но отличается малыми габари-

тами. Модули размещаются в кассете. В основной кассете размещаются модуль питания, ЦП, конвертор питания и до 6 прикладных модулей. В 2-х кассетах расширения размещаются еще 12 прикладных модулей из серии А120.

Семейство 984 (табл. 4.1.3) объединяет функционально мощные ПЛК, используя которые можно развертывать распределенные многоуровневые системы управления с развитой периферией. Серия 984 рассчитана на работу с устройствами ВВ серии 800, которая насчитывает более 50 прикладных модулей, рассчитанных на работу со всеми стандартными сетями передачи информации.

Таблица 4.1.2. Технические характеристики ПЛК 984-А120 Compact

Тип ПЛК	Память		Анал. вх/вых	Дискр. вх/вых	Рег-ы	Быстродейств. мс/К с	Кол. ИНТ. связи	Сеть
	дан-х	польз.						
984-120	2Кс	1,5 Кс	64-	256	1920	5	1	6
984-130	2Кс	4Кс	64	256	1920	5	1	6
984-131	2Кс	4Кс	64	256	1920	5	2	6
984-141	2Кс	8Кс	64	256	1920	5	2	6
984-145	2Кс	8Кс	64	256	1920	5	1	6
984-241	2Кс	8Кс	64	256	1920	2,5	3	6
984-245	2Кс	8Кс	64	256	1920	2,5	2	6
984-251	24 Кс	16 К с	64	256	1920	2,5	3	6
984-255	24 Кс	16 К с	64	256	1920	2,5	2	6

Все ПЛК компании ICT программно и аппаратно совместимы, могут работать с 8-, 16-, 32-элементными панелями, вспомогательной ASCII клавиатурой оператора. Прием, хранение и отображение информации осуществляется с помощью видео- управляющих станций серии PanelMate Plus. Центральные пульта управления могут снабжаться промышленными АРМ FactoryMate Plus.

ПЛК компании В&R также предназначены для создания интегрированных систем управления ОУ. Приведенные в табл. 4.1.4. ПЛК представляют собой модульные контроллеры, что позволяет добиваться нужной для пользователя конфигурации. ПЛК Minicontrol характеризуется небольшими габаритами и стоимостью, однако может использоваться как для простых, так и для сложных объектов. В стан-

дартной кассете ПЛК Minicontrol размещаются 8 функциональных модулей, M-264 - 12, Midicontrol - 9.

Таблица 4.1.3. Технические характеристики ПЛК 984

Тип ПЛК	Память		Анал. вх/вых	Дискр. вх/вых	Рег-ы	Быстро- действ. мс/К с	Кол. ИНТ. связи	Сеть
	дан-х	польз.						
984-381	2 Кс	16 Кс	64	1024	1920	3	2	3-6
984-385e	2 Кс	16 Кс	64	1024	1920	3	2	3-6
984-385d	2 Кс	16 Кс	64	1024	1920	3	2	3-6
984-485k	2 Кс	16 Кс	448	4096	1920	3	2	3-6
984-485e	2 Кс	16 Кс	448	4096	1920	3	2	3-6
984-685	10 Кс	16 Кс	2176	16384	9999	1	3	3-6
984-785d	32 Кс	48 Кс	2176	32768	64 Кс	1	3	3-6
984-785k	32 Кс	48 К с	2176	32768	64 Кс	1	3	3-6
984-785e	32 Кс	48 К с	2176	32768	64 Кс	1	3	3-6

Таблица 4.1.4. Технические характеристики ПЛК компании В&R

Тип ПЛК	Память		Ана- лог вх/вых	Дискр вх/вых	Рег-ы	Быст- ро действ. мс/Кс	Кол. ин- терф связи	Сеть 1
	дан-х	польз.						
Minicontrol	32 К с	16 К с	16	192	8168	4	4	1,3
M-264	42 К с	32 К с	80	264	8168	2,5	8	1-5
Midicontrol	42 К с	32 К с	128	192	8168	2,5	8	1-5
Multicontrol	42 К с	32 К с	256	1536	8168	2,5	16	1-5

В основной кассете ПЛК Multicontrol находятся 16 модулей, а в кассетах расширения их может быть еще 48. В ПЛК Multicontrol и Midicontrol реализована многопроцессорная архитектура, причем в первом ПЛК возможно применение до 6 I параллельных процессоров, а во втором - до 8, а 8 процессоров каждого ПЖ допускает программирования на стандартных языках высокого уровня. Все ПЖ программно и аппаратно совместимы, снабжаются автономными пультами про-

граммирования, панелями операторов серии BRRT с экраном, имеющим от 1 до 20 строк, интеллектуальными панелями операторов XTGR31, рабочими станциями серии Панели XTGR31 и рабочие станции позволяют создавать мнемосхемы, осуществлять контроль параметров и организовать связь с другими фрагментами СА.

ПЛК и ПКК обеих компаний поддерживают все виды каналов связи и предназначены для автоматизации ОУ любой природы. Одно из применений ПЛК Micro 612 дано в работе [67].

4.1.2 Система программирования ПЛК

Для программирования ПЛК используются специфические языки программирования, такие как лестничные диаграммы, лист инструкций (ассемблер), структурированный текст, функциональные блоки, последовательность функциональных схем. Программирование производится либо с автономных пультов, либо с ПЭВМ. ПЛК Multicontrol и Midicontrol позволяют программировать также на языках высокого уровня. Программирование ПЛК осуществляется с помощью программных систем, предлагаемых разработчиками ПЛК [5-7].

ПЛК компании ICT программируются с помощью системы программирования Modsoft, Modsoft Lite, Concept, рабочие станции - MLS, EARS, DRUM, EUCA, HLTH, а APM-Factory Link.

ПЛК компании B&R программируются с помощью системы программирования ProSys, рабочие станции - SPECTO_S. Программным обеспечением разработки многоуровневых систем является пакет программ DCS 2000.

Программное обеспечение не входит в комплект поставки.

4.2 Программное обеспечение ПТК САУ

Современные САУ чаще всего строятся с применением микроконтроллера или программируемых логических контроллеров (ПЛК) и промышленных контроллеров. Поэтому они представляют собой программно-технические комплексы (ПТК), т.к. имеют четко выраженную техническую и программную составляющую. Кроме того, современные ПТК для контроля и управления техническими объектами являются также сетевыми системами, потому что имеют возможность работать в составе компьютерной и телекоммуникационной сети.

Для поддержки работы в составе сети универсальные и управ-

ляющие компьютеры снабжаются сетевыми операционными системами (ОС).

ОС выполняет две основные функции:

- 1) обеспечение пользователю удобств посредством предоставления для него расширенной машины;
- 2) повышение эффективности использования компьютера путем рационального управления его ресурсами.

Использование большинства компьютеров на уровне машинного языка затруднительно ввиду особой трудоемкости программирования. При использовании машинного языка следует указывать не только команду, но и ее многочисленные параметры, которые позволяют запрограммировать один из возможных вариантов выполнения элементарной операции.

ОС представляет собой программный интерфейс, позволяющий программисту или оператору максимально просто взаимодействовать с компьютером, не требуя детальных знаний аппаратурной организации компьютера и механизмов обработки команд и данных.

ОС должна управлять всеми ресурсами вычислительной машины таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность ее функционирования. Управление ресурсами состоит двух общих, не зависящих от типа ресурса задач:

- планирование ресурса - то есть определение, кому, когда, а для делимых ресурсов и в каком количестве, необходимо выделить данный ресурс;
- отслеживание состояния ресурса - то есть поддержание оперативной информации о том, занят или не занят ресурс, а для делимых ресурсов, - какое количество ресурса уже распределено, а какое свободно.

Для решения этих общих задач управления ресурсами разные ОС используют различные алгоритмы, что, в конечном счете, и определяет их облик в целом, включая характеристики производительности, область применения и даже пользовательский интерфейс. Так, например, алгоритм управления процессором в значительной степени определяет, является ли ОС системой разделения времени, системой пакетной обработки или системой реального времени.

4.2.1 Сетевые операционные системы

Сетевая операционная система составляет основу любой

вычислительной сети. Каждый компьютер в сети в значительной степени автономен, поэтому под сетевой ОС в широком смысле понимается совокупность ОС отдельных компьютеров, взаимодействующих с целью обмена сообщениями и разделения ресурсов по единым правилам - протоколам. В узком смысле сетевая ОС - это операционная система отдельного компьютера, обеспечивающая ему возможность работать в сети.

В сетевой операционной системе отдельной машины можно выделить несколько частей:

- средства управления локальными ресурсами компьютера: функции распределения оперативной памяти между процессами, планирования и диспетчеризации процессов, управления процессорами в мультипроцессорных машинах, управления периферийными устройствами и другие функции управления ресурсами локальных ОС.

- средства предоставления собственных ресурсов и услуг в общее пользование - серверная часть ОС (сервер). Эти средства обеспечивают, например, блокировку файлов и записей, что необходимо для их совместного использования; ведение справочников имен сетевых ресурсов; обработку запросов удаленного доступа к собственной файловой системе и базе данных; управление очередями запросов удаленных пользователей к своим периферийным устройствам.

- средства запроса доступа к удаленным ресурсам и услугам и их использования - клиентская часть ОС (редиректор). Эта часть выполняет распознавание и перенаправление в сеть запросов к удаленным ресурсам от приложений и пользователей, при этом запрос поступает от приложения в локальной форме, а передается в сеть в другой форме, соответствующей требованиям сервера. Клиентская часть также осуществляет прием ответов от серверов и преобразование их в локальный формат, так что для приложения выполнение локальных и удаленных запросов неразлично.

- коммуникационные средства ОС, с помощью которых происходит обмен сообщениями в сети. Эта часть обеспечивает адресацию и буферизацию сообщений, выбор маршрута передачи сообщения по сети, надежность передачи и т.п., то есть является средством транспортировки сообщений.

Современная ОС, как правило, должна реализовывать мультипрограммную обработку, виртуальную память, свопинг, поддерживать многооконный интерфейс, а также выполнять многие другие, совершенно необходимые функции. Кроме этих

функциональных требований к операционным системам предъявляются не менее важные рыночные требования. К этим требованиям относятся:

- **Расширяемость:** код должен быть написан таким образом, чтобы можно было легко внести дополнения и изменения, если это требуется, и не нарушить целостность системы.
- **Переносимость:** код должен легко переноситься с процессора одного типа на процессор другого типа и с аппаратной платформы одного типа на аппаратную платформу другого типа.
- **Надежность и отказоустойчивость:** система должна быть защищена как от внутренних, так и от внешних ошибок, сбоев и отказов. Ее действия должны быть всегда предсказуемыми, а приложения не должны быть в состоянии наносить вред ОС.
- **Совместимость:** ОС должна иметь средства для выполнения прикладных программ, написанных для других операционных систем. Кроме того, пользовательский интерфейс должен быть совместим с существующими системами и стандартами.
- **Безопасность:** ОС должна обладать средствами защиты ресурсов одних пользователей от других.
- **Производительность:** Система должна обладать настолько хорошим быстродействием и временем реакции, насколько это позволяет аппаратная платформа.

Рассмотрим более подробно некоторые из этих требований.

Расширяемость. В то время как аппаратная часть компьютера устаревает за несколько лет, полезная жизнь операционных систем может измеряться десятилетиями. Примером может служить ОС UNIX. Поэтому операционные системы всегда эволюционно изменяются со временем, и эти изменения более значимы, чем изменения аппаратных средств. Расширяемость может достигаться за счет модульной структуры ОС, при которой программы строятся из набора отдельных модулей, взаимодействующих только через функциональный интерфейс. Новые компоненты могут быть добавлены в операционную систему модульным путем, они выполняют свою работу, используя интерфейсы, поддерживаемые существующими компонентами. Прекрасные возможности для расширения предоставляет подход к структурированию ОС по типу клиент-сервер с использованием микро ядерной технологии. В соответствии с этим подходом ОС строится как совокупность привилегированной управляющей программы и набора непривилегированных услуг-серверов. Основная часть ОС может оставаться неизменной, в то время как могут быть

добавлены новые серверы или улучшены старые.

Совместимость. Одним из аспектов совместимости является способность ОС выполнять программы, написанные для других ОС или для более ранних версий данной операционной системы, а также для другой аппаратной платформы. Необходимо разделять вопросы двоичной совместимости и совместимости на уровне исходных текстов приложений. Двоичная совместимость достигается в том случае, когда можно взять исполняемую программу и запустить ее на выполнение на другой ОС. Для этого необходимы: совместимость на уровне команд процессора, совместимость на уровне системных вызовов и даже на уровне библиотечных вызовов, если они являются динамически связываемыми. Совместимость на уровне исходных текстов требует наличия соответствующего компилятора в составе программного обеспечения, а также совместимости на уровне библиотек и системных вызовов. При этом необходима перекомпиляция имеющихся исходных текстов в новый выполняемый модуль. Совместимость на уровне исходных текстов важна в основном для разработчиков приложений, в распоряжении которых эти исходные тексты всегда имеются. Но для конечных пользователей практическое значение имеет только двоичная совместимость, так как только в этом случае они могут использовать один и тот же коммерческий продукт, поставляемый в виде двоичного исполняемого кода, в различных операционных средах и на различных машинах.

Безопасность. Правила безопасности определяют такие свойства, как защита ресурсов одного пользователя от других и установление квот по ресурсам для предотвращения захвата одним пользователем всех системных ресурсов. Обеспечение защиты информации от несанкционированного доступа является обязательной функцией сетевых операционных систем. В большинстве популярных систем гарантируется степень безопасности данных, соответствующая уровню C2 в системе стандартов США. Основы стандартов в области безопасности были заложены "Критериями оценки надежных компьютерных систем". Этот документ, изданный в США в 1983 году национальным центром компьютерной безопасности (NCSC - National Computer Security Center), часто называют Оранжевой книгой. В соответствии с требованиями Оранжевой книги безопасной считается такая система, которая "посредством специальных механизмов защиты контролирует доступ к информации таким образом, что только имеющие соответствующие полномочия лица или процессы, выполняющиеся от их имени, могут получить доступ на чтение, запись, со-

здание или удаление информации". Иерархия уровней безопасности, приведенная в Оранжевой книге, помечает низший уровень безопасности как D, а высший - как A.

4.2.2 Семейство операционных систем UNIX

UNIX имеет долгую и интересную историю. Начавшись как проект молодых исследователей, UNIX стал многомиллионной индустрией, включив в свою орбиту университеты, корпорации, правительства и международные организации стандартизации.

UNIX зародился в лаборатории Bell Labs фирмы AT&T более 40 лет назад. В то время Bell Labs занималась разработкой многопользовательской системы разделения времени MULTICS (Multiplexed Information and Computing Service) совместно с MIT и General Electric, но эта система потерпела неудачу. Один из ее исследователей Кен Томпсон занялся поисковой работой в направлении улучшения операционной среды Bell Labs. Томпсон, а также другой сотрудник Bell Labs Денис Ритчи разрабатывали новую файловую систему, многие черты которой вели свое происхождение от MULTICS. Для проверки новой файловой системы Томпсон написал ядро ОС и некоторые программы для компьютера GE-645, который работал под управлением мультипрограммной системы разделения времени GECOS. Из этой работы и возникла первая версия UNIX, хотя она и не имела в то время никакого названия. Но она уже включала характерную для UNIX файловую систему, основанную на индексных дескрипторах inode, имела подсистему управления процессами и памятью, а также позволяла двум пользователям работать в режиме разделения времени. Система была написана на ассемблере. Имя UNIX (Uniplex Information and Computing Services) было дано ей еще одним сотрудником Bell Labs Брайаном Керниганом.

Большое влияние на судьбу UNIX оказала перепись ее на языке высокого уровня C, разработанного Денисом Ритчи специально для этих целей. Это произошло в 1973 году, UNIX насчитывал к этому времени уже 25 инсталляций, и в Bell Labs была создана специальная группа поддержки UNIX.

Широкое распространение UNIX получил с 1974 г., после описания этой системы Томпсоном и Ритчи в компьютерном журнале CACM. UNIX получил широкое распространение в университетах, так как для них он поставлялся бесплатно вместе с исходными кодами на C. Широкое распространение эффективных C-компиляторов

сделало UNIX уникальной для того времени ОС из-за возможности переноса на различные компьютеры. Университеты внесли значительный вклад в улучшение UNIX и дальнейшую его популяризацию. Еще одним шагом на пути получения признания UNIX как стандартизированной среды стала разработка Денисом Ритчи библиотеки ввода-вывода `stdio`. Благодаря использованию этой библиотеки для компилятора C, программы для UNIX стали легко переносимыми.

Наибольшее распространение получили две весьма несовместимые линии версий UNIX: линия AT&T - UNIX System V, и линия университета Berkeley - BSD. Многие фирмы на основе этих версий разработали и поддерживают свои версии UNIX: SunOS и Solaris фирмы Sun Microsystems, UX фирмы Hewlett-Packard, XENIX фирмы Microsoft, AIX фирмы IBM, UnixWare фирмы Novell и т.д.

Независимо от версии общими для UNIX чертами являются:

- многопользовательский режим со средствами защиты данных от несанкционированного доступа;
- реализация мультипрограммной обработки в режиме разделения времени, основанная на использовании алгоритмов вытесняющей многозадачности (*preemptive multitasking*);
- использование механизмов виртуальной памяти и свопинга для повышения уровня мультипрограммирования;
- унификация операций ввода-вывода на основе расширенного использования понятия "файл";
- иерархическая файловая система, образующая единое дерево каталогов независимо от количества физических устройств, используемых для размещения файлов;
- переносимость системы за счет написания ее основной части на языке C;
- разнообразные средства взаимодействия процессов, в том числе и через сеть;
- кэширование диска для уменьшения среднего времени доступа к файлам.

4.2.3 Сетевые продукты Microsoft

В 1984 году компания Microsoft выпустила свой первый сетевой продукт, называемый Microsoft Networks, который обычно неформально называют MS-NET. Некоторые концепции, заложенные в MS-NET, такие как введение в структуру базовых компонент -

редиректора и сетевого сервера - успешно перешли в LAN Manager, а затем и в Windows NT.

Microsoft разработала также сетевую ОС LAN Manager. LAN Manager требует установки на файл-сервере операционной системы OS/2, рабочие станции могут работать под MS DOS, Windows или OS/2. OS/2 - это операционная система, реализующая истинную многозадачность, работающая в защищенном режиме микропроцессоров x86 и выше. LAN Manager использует 32-х битную версию файловой системы OS/2, называемую HPFS, которая оптимизирована для работы на файл-сервере за счет кэширования каталогов и данных. LAN Manager - это первая сетевая ОС, разработанная для поддержки среды клиент-сервер. Ключевыми компонентами LAN Manager являются редиректор и сервер. Особенно эффективно LAN Manager поддерживает архитектуру клиент-сервер для систем управления базами данных. LAN Manager разрешает рабочим станциям под OS/2 поддерживать сетевой сервис по технологии "равный-с равным". Это означает, что рабочая станция может выполнять функции сервера баз данных, принт-сервера или коммуникационного сервера. Ограничением является то, что только один пользователь, кроме владельца этой рабочей станции, имеет доступ к такому одноранговому сервису.

Для работы в небольшой сети фирма Microsoft разработала компактную, не требующую значительных аппаратных или программных затрат операционную систему Windows for Workgroups, известную также как Windows 3.11. Эта операционная система позволяет организовать сеть по схеме "равный-с равным", при этом нет необходимости приобретать специальный компьютер для работы в качестве сетевого сервера. В Windows 3.11 достигнута высокая производительность сетевой обработки за счет того, что все сетевые драйверы являются 32-х разрядными виртуальными драйверами.

С середины 1993 года Microsoft начала выпуск новых операционных систем "новой технологии" (New Technology - NT) Windows NT. В сентябре 1995 года компания Microsoft выпустила еще одну новую операционную систему Windows 95 (кодовое название Chicago), предназначенную для замены Windows 3.1 и Windows 3.11 в персональных компьютерах с процессорами Intel x86.

В настоящее время известны и другие эффективные разработки компании Microsoft: Windows 98, Windows 2000, Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8.

4.2.4 Языки программирования ПЛК

Программирование систем управления на основе ПЛК выполняется с помощью Системы программирования и библиотеки стандартных программ (БСП). Система программирования - это уникальный пакет программного обеспечения, который позволяет создавать программы контроля и управления для ПЛК, используя персональный компьютер или устройство программирования ПЛК.

В ПЛК ОС контролирует аппаратные средства ПЛК, тестируя источник питания, память, модули ввода-вывода, интерфейсы, таймеры и часы реального времени. Система исполнения включает драйверы модулей ввода-вывода, загрузчик кода программ пользователя, интерпретатор команд и отладочный монитор. Код ОС расположен в ПЗУ и может быть изменен только изготовителем ПЛК. ОС не решает конкретные прикладные задачи, а лишь обеспечивает работу других программ, управляет ресурсами вычислительной системы. Прикладное ПО поставляется изготовителем ПЛК в виде БСП или разрабатывается пользователем ПЛК при помощи системы программирования. Оно размещается в энергонезависимой памяти.

Для унификации инженерных, технологических и программных решений, стандартизации и автоматизации программирования ПЛК, был разработан международный стандарт IEC 61131-3. IEC - International Electrotechnical Commission (МЭК - Международная электротехническая комиссия) - международная некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий. Способствует развитию и распространению стандартов и систем стандартов. IEC 61131-3 - раздел международного стандарта IEC 61131 (МЭК 61131), описывающий языки программирования для ПЛК (табл. 4.2.1).

IL (Instruction List) - по синтаксису напоминает ассемблер. Ориентирован на профессиональных программистов и разработчиков контроллеров и ПО для них. Является вместе с **LLD** одним из самых распространённых языков при программировании ПЛК.

ST (Structured Text) - структурированный текст, адаптированный вариант языка Паскаль. Предназначен для программирования промышленных контроллеров и операторских станций. Широко используется в SCADA/HMI/SoftLogic пакетах. По структуре ближе всего к языку программирования Паскаль. Удобен для написания больших программ и работы с аналоговыми сигналами и числами с плавающей точкой. Основой ST-программы служат выражения. Выражения со-

стоят из операндов (констант и переменных) и операторов. Операторы являются командами языка программирования ST. Они должны заканчиваться точкой с запятой. Одна строка может содержать несколько операторов (отделяемых точками с запятой). Результат вычисления выражения присваивается переменной при помощи оператора присваивания :=. Каждое выражение обязательно заканчивается точкой с запятой ";".

Таблица 4.2.1

Английский	Русский	Описание
Обозначение	Обозначение	
IL - Instruction List	IL - Список инструкций	Текстовый язык. Аппаратно-независимый низкоуровневый ассемблероподобный язык.
LLD - Ladder Logic Diagram	LLD – лестничные логические диаграммы	Графический язык. Представляет собой программную реализацию электрических схем на базе электромагнитных реле.
FBD - Function Block Diagram	FBD - Диаграммы функциональных блоков	Графический язык. Функциональный блок (ФБ) выражает некую подпрограмму. Каждый ФБ имеет входы (слева) и выходы (справа). Программа создается путем соединения множества ФБ.
SFC - Sequential Function Chart	SFC - Последовательные функциональные диаграммы	Графический высокоуровневый язык. Создан на базе математического аппарата сетей Петри. Описывает последовательность состояний и условий переходов.
ST - Structured Text	ST - Структурированный текст	Текстовый Паскалеподобный язык программирования

LLD (Ladder Logic Diagram) - язык лестничных логических диаграмм. Это графический язык в терминах контактов и катушек. Применяются также названия: язык релейно-контактной логики; релейные диаграммы; релейно-контактные схемы; язык программирования релейно-лестничной логики.

Предназначен для программирования ПЛК. Синтаксис языка удобен для замены логических схем, выполненных на релейной тех-

нике. Ориентирован на инженеров по автоматизации, работающих на промышленных предприятиях. Обеспечивает наглядный интерфейс логики работы контроллера, облегчающий не только задачи собственно программирования и ввода в эксплуатацию, но и быстрый поиск неполадок в подключаемом к контроллеру оборудовании.

FBD (Function Block Diagram) - язык функциональных блоков. Предназначен для программирования ПЛК. Программа образуется из списка цепей, выполняемых последовательно сверху вниз. Цепи могут иметь метки. Инструкция перехода на метку позволяет изменять последовательность выполнения цепей для программирования условий и циклов. При программировании используются наборы библиотечных блоков и собственные блоки, также написанные на FBD или других языках IEC 61131-3. Блок (элемент) - это подпрограмма, функция или функциональный блок (И, ИЛИ, НЕ, триггеры, таймеры, счётчики, блоки обработки аналогового сигнала, математические операции и др.). Каждая отдельная цепь представляет собой выражение, составленное графически из отдельных элементов. К выходу блока подключается следующий блок, образуя цепь. Внутри цепи блоки выполняются строго в порядке их соединения. Результат вычисления цепи записывается во внутреннюю переменную либо подается на выход ПЛК.

SFC (Sequential Function Chart) - язык последовательных функциональных схем. Предназначен для ПЛК. Широко используется в SCADA/HMI пакетах. SFC - графический язык, предназначенный для написания программ последовательного управления технологическим процессом, описывающий его в форме близкой к диаграмме состояний. Аналогом может служить сеть Петри с разноцветными фишками. В каждом состоянии система выполняет действия (подпрограммы) с определенными модификаторами. Например, модификатор N - исполнять, пока состояние активно.

Инструменты программирования на языках МЭК 61131-3. Наибольшей известностью в мире пользуются следующие системы программирования ПЛК (SoftPLC или SoftLogic): CoDeSys, ISaGRAF, MULTIPROG, SIMATIC STEP 7, GXDeveloper, OpenPCS, MasterPLC Designer, Concept, Unity Pro, Visilogic (Unitronics PLC), TwinCAT, B&R Automation Studio, 1Tool (Carel).

CoDeSys - инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации. Производится и распространяется компанией 3S-Smart Software Solutions GmbH (Кемптен, Германия). Название CoDeSys является акронимом от **C**ontroller **D**evelopment **S**ystem.

Версия 1.0 была выпущена в 1994 году. Основой комплекса CoDeSys является среда разработки прикладных программ для ПЛК. Она распространяется бесплатно и может быть без ограничений установлена на нескольких рабочих местах. В CoDeSys для программирования доступны все пять определяемых стандартом IEC 61131-3 языков. В дополнение к FBD поддержан язык программирования SFC (Continuous Function Chart) с произвольным размещением блоков и расстановкой порядка их выполнения. В CoDeSys реализован ряд других расширений спецификации стандарта IEC 61131-3. Самым существенным из них является поддержка объектно-ориентированного программирования (ООП). Встроенные компиляторы CoDeSys генерируют машинный код (двоичный код), который загружается в контроллер. Поддержаны основные 16-и и 32-х разрядные процессоры: Infineon C166, TriCore, 80x86, ARM (архитектура), PowerPC, SH, MIPS (архитектура), Analog Devices Blackfin, TI C2000/28x и другие. При подключении к контроллеру, среда программирования CoDeSys переходит в режим отладки. В нем доступен мониторинг, изменение и фиксация значений переменных, точки останова, контроль потока выполнения, горячее обновление кода, графическая трассировка в реальном времени и другие отладочные инструменты. CoDeSys версии V3 построен на базе так называемой платформы автоматизации CoDeSys Automation Platform. Она позволяет изготовителям оборудования развивать комплекс путем подключения собственных плагинов. Расширенная профессиональная версия среды разработки носит название CoDeSys Professional Developer Edition. Она включает поддержку UML диаграмм классов и состояний, подключение системы контроля версий Subversion, статистический анализатор и профилировщик кода. Распространяется по лицензии. Инструмент CoDeSys Application Composer позволяет перейти от программирования практических приложений к их быстрому составлению. Существует специальный инструмент, позволяющий адаптировать ее к различным аппаратным и программным платформам.

ISaGRAF® - мощная программная технология для разработки встраиваемых приложений, основывается на концепции открытой автоматизации и обеспечивает существенное сокращение времени создания изделий и ускоряет их выход на рынок. Производитель ICS Triplex. ISaGRAF - технология программирования контроллеров, которая позволяет создавать как локальные, так и распределенные системы управления. Основа технологии - среда разработки приложений (ISaGRAF Workbench) и адаптируемая под различные аппаратно-

программные платформы исполнительная система (ISaGRAF Runtime). В многозадачной системе могут исполняться несколько исполнительных систем ISaGRAF PRO с различными циклами опроса. Механизм связывания переменных обеспечивает передачу данных между исполнительными системами как в локальном, так и в распределенном проекте, причем аппаратные платформы могут работать под управлением различных операционных систем. ISaGRAF - инструмент разработки прикладных программ для ПЛК на языках стандарта IEC 61131-3 и IEC 61499, который позволяет создавать локальные или распределенные системы управления. Основа технологии - среда разработки приложений (ISaGRAF Workbench) и адаптируемая под различные аппаратно-программные платформы исполнительная система (ISaGRAF Runtime). В настоящее время ISaGRAF производится и распространяется компанией ICS Triplex ISaGRAF. В ISaGRAF поддерживаются все пять языков стандарта IEC 61131-3. В версии ISaGRAF 5.0 реализована поддержка нового типа функциональных блоков, определяемых стандартом IEC 61499. В ISaGRAF реализован ряд расширений спецификации стандарта IEC 61131-3, в частности язык Flow Chart. На основе вычислительного ядра ISaGRAF разработаны расширения, которые позволяют рассматривать ISaGRAF в качестве универсальной среды для создания интегрированных решений в области АСУ ТП. Основные расширения ISaGRAF:

- ISaGRAF 5++ ACE Target;
- Система быстрого доступа к данным, FDA (ISaFDA, FDA-OPC и конфигуратор FDA):
 - ISaGRAF Archive System - IAS (IAS Logger, IAS Configurator, IAS Collector, Integrated Project Designer);
 - Модуль JIT-компиляции в машинный код x86;
 - Графический интерфейс ISaGUI;
 - Дополнительные библиотеки функций (Fast_array, Fast_matrix, измерения времени с высоким разрешением, обработки сигналов, работы с COM-портами, ПИД-регулятор);
 - Реализация протокола IEC (МЭК) 60870-5-104.

Simatic Step 7 - программное обеспечение фирмы Siemens AG [71] для разработки систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров Simatic S7-300/S7-400/M7/C7 и WinCC. Программное обеспечение выпускается с интерфейсом на английском, немецком, французском, итальянском и испанском языках. Специальные версии обеспечивают работу на японском и китайском языках. Предшественником данного ПО является более ранняя версия

Simatic Step 5, работающая в ОС DOS или в DOS окне ОС Windows . Различают следующие версии: Simatic Step 7, Simatic Step 7 Professional, Simatic Step 7 Lite. Для контроллеров Simatic S7-200 существует собственный программный продукт Step 7 MicroWin. С помощью этих программных продуктов выполняется комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации на основе ПЛК Simatic S7-300 и Simatic S7-400 фирмы Siemens. В основе работы лежит концепция проекта, под которым понимается комплексное решение задачи автоматизации, включая несколько взаимосвязанных ПЛК, соединяющие их сети и системы человеко-машинного интерфейса. Работу с проектом в целом обеспечивает главная утилита Step 7 - Simatic Manager. Step 7 позволяет производить конфигурирование ПЛК и сетей (утилиты HWConfig и NetPro). В процессе конфигурирования определяется состав оборудования в целом, разбиение на модули, способы подключения, используемые сети, выбираются настройки для используемых модулей. Система проверяет правильность использования и подключения отдельных компонент. Завершается конфигурирование загрузкой выбранной конфигурации в оборудование, что по сути является настройкой оборудования. Утилиты конфигурирования позволяют осуществлять диагностику оборудования, обнаруживать аппаратные ошибки или неправильный монтаж оборудования. Программирование контроллеров производится редактором программ, обеспечивающим написание программ на трех языках. Simatic Step 7 поддерживаются все пять языков стандарта IEC 61131-3. В дополнение к пяти основным языкам могут быть добавлены два дополнительных языка, поставляемые отдельно: GRAPH 7 - язык управления последовательными технологическими процессами, HiGraph 7 - язык управления на основе графа состояний системы. Возможность наблюдения за текущим состоянием программы, доступное при использовании любого языка программирования, обеспечивает не только отладку программного обеспечения, но и поиск неисправностей в подключаемом оборудовании, даже если оно не имеет средств диагностики. Интегрированная разработка систем автоматизации на основе Step 7. В полной мере эти преимущества проявляются при использовании системы проектирования PCS7, в основе которой также используется Step 7. Аналогично в Step 7 интегрируется программное обеспечение для настройки и управления сложными измерительными или исполнительными устройствами автоматизации, например, частотными приводами. Step 7 также позволяет проектировать сетевые настройки, соединения и передачу данных между устройствами авто-

матизации, например, системы Master-Slave при обмене данных по шине Profibus с использованием протокола DP.

Уникальная особенность комплекса **OpenPCS** (OpenPCS Infoteam Software GmbH, <http://www.infoteam.de>) заключается в использовании языка ПЛ в качестве промежуточного кода. Элементы программы, выполненные на любом МЭК-языке, можно копировать в буфер обмена Windows и вставлять в программу на другом языке с автоматическим перекодированием. Для достижения высокого быстродействия в составе комплекса присутствуют компиляторы машинного кода для ряда распространенных процессоров. Симулятор ПЛК SmartSIM позволяет проводить обучение и отладку без внешней аппаратуры.

Фирма Softing - крупный поставщик систем промышленной автоматизации. По всей видимости, комплекс **SoftCONTROL** (SoftCONTROL Softing GmbH, <http://www.softing.com>) создавался специалистами фирмы для себя, но благодаря удачному построению перерос в универсальный инструмент. Комплекс имеет сравнительно аскетичный интерфейс. Тем не менее, это не отражается на качестве реализации транслятора и отладочного инструментария. Таким образом, SoftCONTROL более напоминает выверенный годами инструмент опытного автомеханика, чем подарочный набор. Благодаря такому подходу комплекс имеет минимальные требования как к ПК, так и к ПЛК. Язык C интегрирован в систему и может применяться в пользовательских программах равноправно МЭК-языкам.

4.3 Цифровая САУ двигателем постоянного тока

Возможный вариант использования микроЭВМ в качестве цифрового регулятора показан на рис. 4.3.1. ОУ в представленной схеме является усилитель мощности (УМ), двигатель постоянного тока (ДПТ) с нагрузкой. Система рассматривается, как цифровая система управления с периодом квантования T сек.

Цель управления: стабилизация скорости вращения $\omega(t)$ ДПТ при задании $\omega(t)$. Ошибка рассогласования

$$\varepsilon(t) = \omega_0 - \omega(t) \quad (4.3.1)$$

Таким образом, на вход микро ЭВМ действует дискретный сигнал ошибки, $\varepsilon(kt)$, $k = 0, 1, 2, \dots$, а на выходе микро ЭВМ имеется

управляющий сигнал $u[kT]$. Пусть микро ЭВМ реализует ПИ-закон регулирования, который записывается в аналоговом виде:

$$u(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (4.3.2)$$

где t_0 - начальный момент времени.

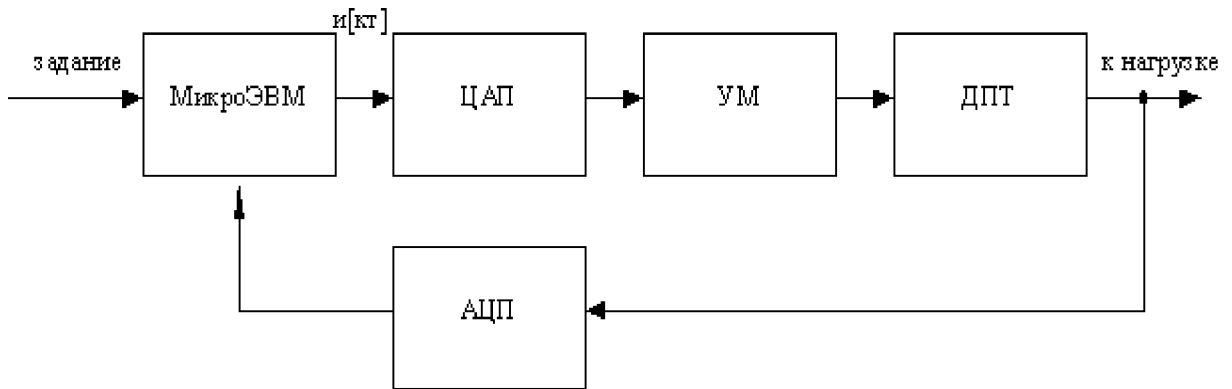


Рисунок 4.3.1 Функциональная структура системы управления ДПТ с микроЭВМ

Обозначим интеграл как:

$$x(t) = \int_{t_0}^t [\omega_0 - \omega(\tau)] d\tau + x(t_0), \quad (4.3.3)$$

где $x(t_0)$ - начальное значение $x(t)$.

Пусть $t_0 = (k-1)T$, $t = kT$ и для вычисления интеграла используется метод трапеций. Тогда

$$x(t) = \int_{(k-1)T}^{kT} [\omega_0 - \omega(t)] dt \approx \omega_0 T - \frac{T}{2} \{ \omega[kT] + \omega[(k-1)T] \}, \quad \kappa = 1, 2, \dots \quad (4.3.4)$$

Таким образом, для вычисления интеграла необходимо знать задание

$$\omega_0, \omega[(k-1)T], \omega[kT].$$

Однако это при условии, если микропроцессор производит вычисления мгновенно. Но поскольку интеграл микропроцессором

(МП) вычисляется за конечное время в момент $t = kT$ не будет результата.

Предположим, что временная задержка равна периоду квантования T , т.е. результат появляется в момент времени $t = (k+1)T$.

С учетом этого (4.3.4) запишется в виде:

$$x[(k+1)T] = \omega_0 T - \frac{T}{2} \{ \omega[kT] + \omega[(k-1)T] \} + x[kT], \quad (4.3.5)$$

где $x[kT]$ — начальное значение $x[kT]$. Заметим, что в качестве начального значения $x[t]$ берется не $x[(k-1)T]$, а $x[kT]$.

Подставляя (5.3.5) в (5.3.2) получаем:

$$u[(k+1)T] = k_p \left\{ \omega_0 - \omega[kT] + \frac{1}{T_H} x[(k+1)T] \right\} \quad (4.3.6)$$

Управление $u(t)$ изменяется каждые T сек и остается постоянным в течении времени T .

На рис.4.3.2 показана типичная функциональная схема ЦСУ.

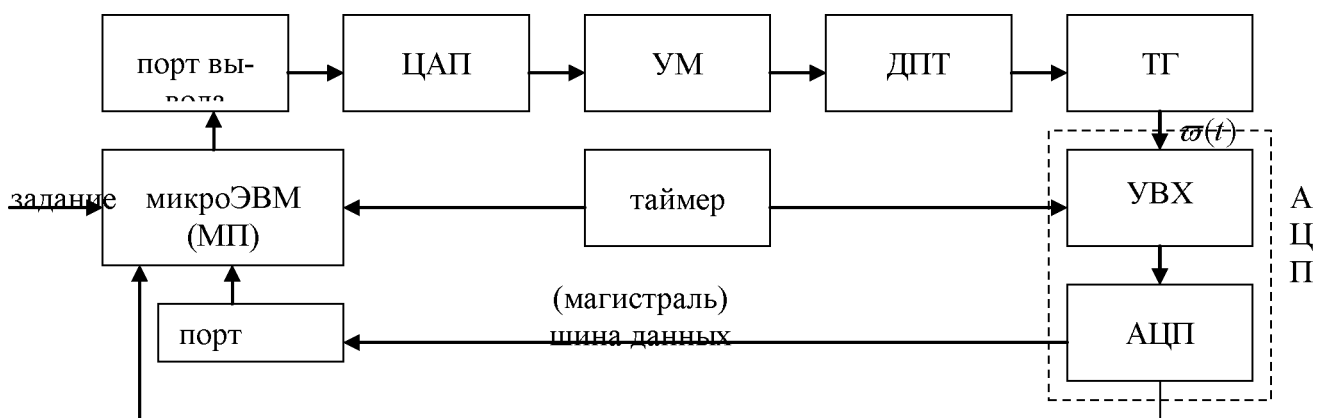


Рисунок 4.3.2 Функциональная схема реализации цифрового (ПИ-) регулятора: УВХ – устройство выборки и хранения АЦП.

4.4 САУ трансформаторными подстанциями

Электроэнергетика является важной отраслью хозяйственно-экономической деятельности. Применение систем автоматизации позволяет поднять эффективность отрасли, повысить точность и качество работы, снизить непроизводительные затраты. Задача

автоматизации силовых трансформаторных подстанций (ТП), которые являются важными элементами системы транспортировки и распределения электроэнергии, является одной из интересных задач автоматизации объектов электроэнергетики.

Рассмотрим САУ ТП с применением функционального цифрового измерителя РМ-500 и ПЛК, что позволяет построить иерархическую САУ трансформаторных подстанций района энергоснабжения (РЭС) [72].

Требования к системе. Разрабатываемая система предназначена для:

- измерения и отображения значений основных параметров;
- контроля нижних и верхних допустимых значений параметров;
- выработки и реализации управляющих воздействий при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы.

При этом к ней предъявляются следующие требования:

- чувствительность и избирательность защиты;
- быстрое и надёжное отключение всех видов повреждений;
- ведение журнала регистрации событий;
- наличие удобного и наглядного интерфейса оператора, действующего в реальном времени;
- открытость для вышестоящего уровня иерархии.

Назначение. САУ предназначена для защиты ТП от следующих видов повреждений и ненормальных режимов работы:

- многофазных замыканий в обмотках и на выводах;
- однофазных замыканий на землю в обмотках и на выводах, присоединённых к сети с глухозаземленной нейтралью;
- однофазных замыканий на землю в сетях 10 кВ с изолированной нейтралью, если трансформатор питает сеть, в которой отключение однофазных замыканий на землю необходимо по требованиям безопасности;
- витковых замыканий в обмотках;
- токов в обмотках, обусловленных внешними КЗ;
- токов в обмотках, обусловленных перегрузкой;
- понижения уровня масла;
- внутренних повреждений.

Обязательным видом защиты всех масляных трансформаторов мощностью 6300 кВ·А и более является газовая защита.

Функциональная структура САУ. Для создания САУ исполь-

зуются трансформаторы тока и напряжения в качестве чувствительных элементов, микропроцессорный измеритель РМ-500 как система автоматизации нижнего уровня, ПЛК как система автоматизации среднего уровня, и компьютерная информационная сеть как вышестоящий уровень системы автоматизации. Таким образом, система представляет собой трехуровневую иерархическую САУ, функциональная схема (ФС) которой дана на рис. 4.4.1. Пояснения к рисунку:

РМ500 – функциональный цифровой измеритель, предназначенный для измерения контролируемых параметров ТП и выполнения некоторых команд аварийного управления. **Распределитель** служит для переключения канала передачи команд управления. Это устройство, имеющее один вход, ряд выходов и обеспечивающее поочередное возникновение импульсов (потенциалов) на этих выходах. Распределители могут работать непрерывно в течение длительного времени, поэтому их называют непрерывно действующими, т.е. циклическими, устройствами, для чего последний элемент распределителя по цепи связи подготавливает первый. В распределителе считывания и запись информации осуществляется строго последовательно. **Мост** – устройство, предназначенное для соединения двух локальных сетей, использующих различные протоколы, **СА₁...СА_n** – сетевые адаптеры. **Сервер** – специализированный компьютер информационной сети, **М** – маршрутизатор, **ЦДП** – центральный диспетчерский пункт, **СОИ** – средства отображения информации.

Описание работы ФС. Структура иерархической САУ, представленной на рис. 4.4.1, состоит из трех уровней:

Первый уровень: 1) трансформаторная подстанция (ТП); 2) датчики – трансформаторы тока и напряжения; 3) измеритель РМ500; 4) усилители; 5) исполнительные механизмы (ИМ).

Второй уровень: 1) последовательный интерфейс RS 485; 2) ПЛК; 3) распределитель; 4) мост; 5) сетевой адаптер.

Третий уровень: 1) оборудование центрального диспетчерского пункта (ЦДП); 2) сервер; 3) локальные компьютеры (K_1, \dots, K_n); 4) средства отображения информации.

Все параметры ТП вычисляются по данным прямых измерений токов и напряжений на входе и выходе трансформатора, поступающих на измеритель РМ500. РМ500 обеспечивает такие функции, как аварийная сигнализация, аварийное управление и связь с вторым уровнем ИУС.

Измеряемые токи и напряжения через трансформаторы тока и напряжения поступают на вход модуля аналогового ввода IO11,

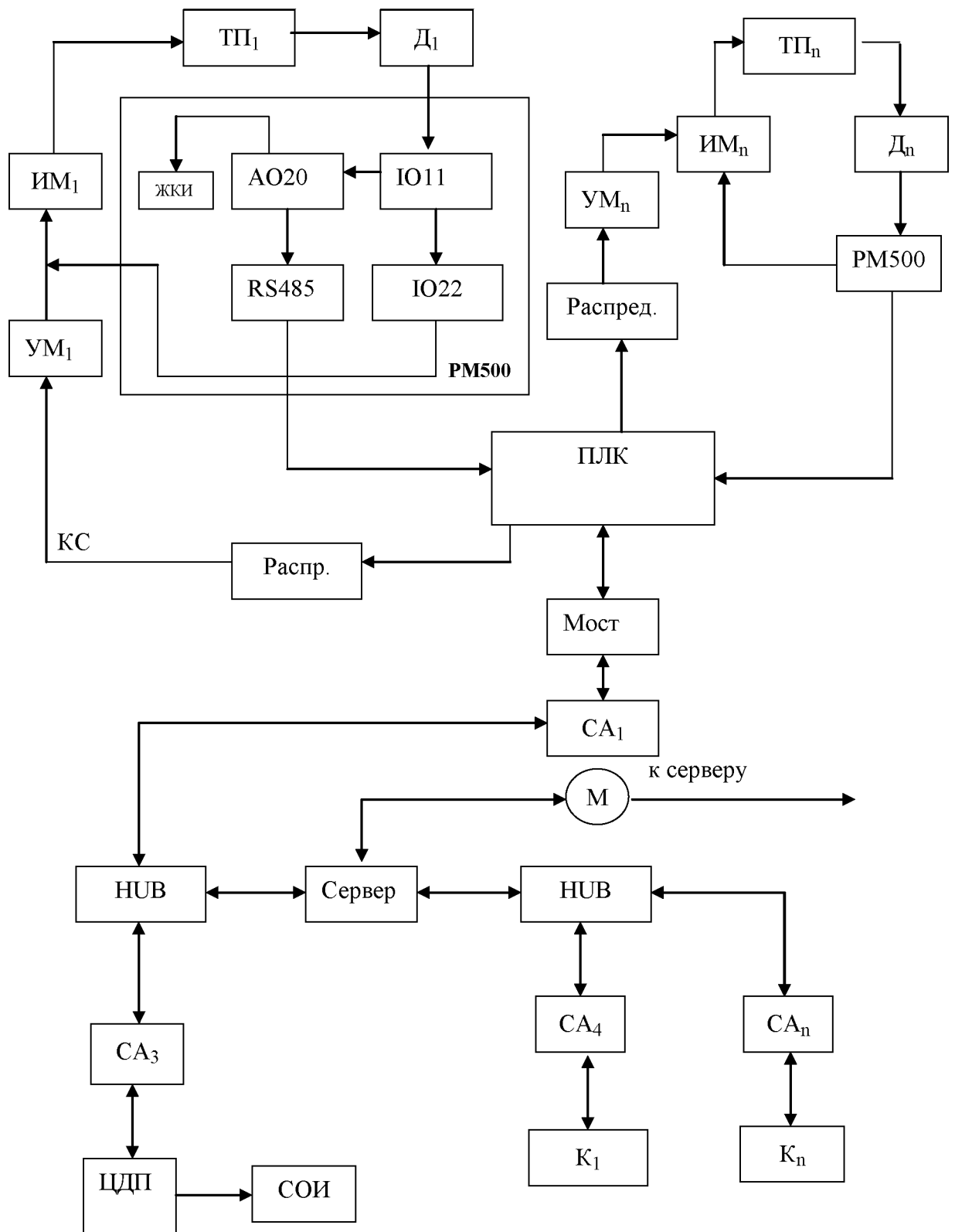


Рисунок 4.4.1 Функциональная схема САУ ТП.

который после вычисления косвенно измеряемых параметров передает данные на аварийный модуль IO22 и модуль аналогового вывода

унифицированного сигнала АО22.

Аварийный модуль Ю22 сравнивает поступающую информацию с заданными уставками – верхними и/или нижними допустимыми значениями токов и напряжений – и вырабатывает величины для двух видов действий: 1) аварийной звуковой и световой сигнализации; 2) аварийного управления. Усиленные при необходимости сигналы аварийного управления поступают на исполнительные устройства для выполнения аварийных действий. Уставки аварийного управления формируются ПЛК. В качестве ИМ могут быть использованы выключатели, разъединители, устройства автоматического включения резерва (УАВР) и устройства автоматического повторного включения (УАПВ). РМ500 выполняет все виды токовых защит, кроме дифференциального.

Модуль аналогового вывода АО22 преобразует сигнал, полученный от модуля Ю11 в унифицированный аналоговый сигнал, и через двухпроводный интерфейс RS485 передает на ПЛК.

ПЛК выполняет функции контроля, аварийного управления группой ТП (например, на территории жилого микрорайона) и организует связь с третьим (вышестоящим) уровнем САУ.

ЦДП рассчитан на контроль, управление и координацию работы системы электроснабжения и электроустановок района. Здесь решаются такие задачи, как:

- расчет технико-экономических показателей района электроснабжения;
- расчеты с потребителями и поставщиками;
- контроль и управления системы электроснабжения;
- оптимизация работы системы электроснабжения;
- автоматическая локализация неисправностей в системе распределения электроэнергии;
- контроль и защита трансформаторных подстанций;
- автоматизированный учет потребления электроэнергии у покупателей;
- организация связи с ЦДП электроснабжения города (республики)

Измеритель РМ500. Компактное цифровое устройство размерами 96x96x60 мм и весом 0,4 кг (рис. 4.4.2) предназначен для измерения таких параметров электроустановок, как ток, напряжение, частота, мощность, к.п.д., коэффициент гармоник. РМ500 также может выполнять функции сигнализации и формировать управляющие воздействия. Измеритель имеет ряд преимуществ над аналоговыми изме-

рителями.



Рисунок 4.4.2 Функциональный измеритель PM500.

На рисунке показаны следующие органы управления и отображения информации:

- 1 - отображение мгновенных и средних значений токов;
- 2 - отображение значений напряжения и частоты;
- 3 - отображение мгновенной и средней мощности;
- 4 - отображение коэффициента мощности и суммарного коэффициента гармоник тока и напряжения;
- 5 - отображение максимального значения тока и мощности;
- 6 - отображение значения энергии и времени процесса;
- 7 - жидкокристаллический дисплей (ЖКД), позволяющий одновременно отображать 5 измерений при быстром просмотре.

Измеритель PM500 обеспечивает измерение следующих величин: ток (мгновенное и среднее значение); напряжение (фазное и междуфазное); частота; мощность (фазная, суммарная, максимальная и средняя); коэффициент мощности (на фазе и суммарная); коэффициент гармоник (тока и напряжения).

Характеристики PM500 сведены в таблицу 4.4.1. Измеритель PM500 содержит функциональные модули следующих типов.

Модуль аналогового ввода-вывода IO11. Модуль имеет один цифровой вход и один импульсный выход. Цифровой вход рассчитан на сигнал 10-30В постоянного напряжения, импульсный выход - 0.5А при 100В постоянного напряжения.

Таблица 4.4.1

№ п.п	Параметр	Значение
1	напряжение питания/мощность: переменное	110-400 В \pm 10% / 10 ВА
	постоянное	120-350В \pm 20% / 10 Вт
	постоянное	24-48В \pm 20% / 10 Вт
2	прочность изоляции	2.5 кВ
3	входное переменное напряжение	50 - 480 В
4	измеряемое переменное напряжение	до 400 кВ
5	допустимая нагрузка	1.5U _N
6	входной переменный ток	0 – 1 А или 0 – 5 А
7	измеряемый переменный ток	5 – 10000 А
8	диапазон измерения на шкале 0 – 1 А	0.02-2 I _N
9	диапазон измерения на шкале 0 – 5 А	0.004 - 2I _N
10	допустимая нагрузка	4 I _N
11	точность измерения: тока и напряжения	0.5%;
	мощности	1%;
	частоты	0.1%
12	диапазон измерения частоты	45-65 Гц
13	период обновления данных	1сек.

Аварийный модуль IO22 рассчитан на следующие функции:
1) сигнализация (световая, звуковая); аварийное управление. Существует два цифровых входа для отображения позиций или считывание импульса и два выхода для управления или сигнальных функций. На цифровой вход можно подавать сигналы постоянного напряжения 10-30В, цифровой выход формирует сигнал 0 - 5А при 250В переменного напряжения.

Модуль аналогового вывода AO20. Имеется два аналоговых выхода 4-20 мА, предназначенные для вывода значений тока, напряжения, частоты, мощности. Информация передается на ЖКД, а через двухпроводный интерфейс RS485 - на ПЛК.

Соппротивление нагрузки выхода - 0-600 Ом.

PM500 может быть модернизирован путем расширения дополнительными модулями согласно поставленным задачам, чтобы соответствовать требованиям потребителей.

Схемы подключения PM500 к ТП дана на рисунках 4.4.3 и 4.4.4.

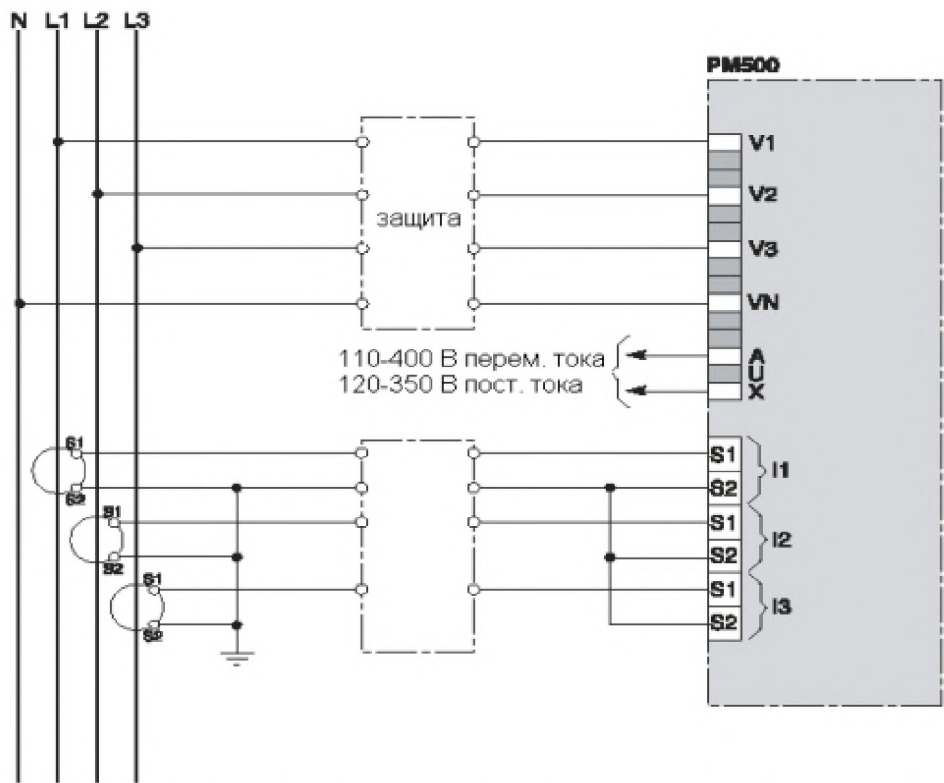


Рисунок 4.4.3 4-х проводное соединение трансформатора тока с РМ-500.

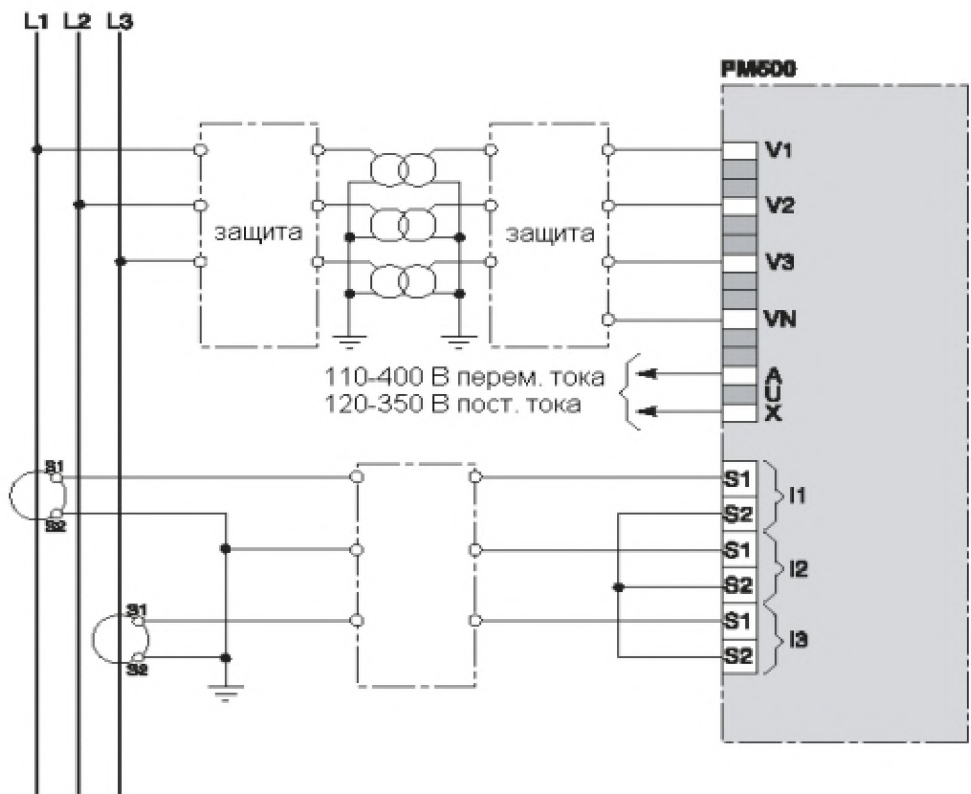


Рисунок 4.4.4 3-х проводное соединение трансформатора тока и напряжения с РМ-500.

4.5 САУ очистной установки

Автоматизация и оптимизация очистки сточных вод решают важную экологическую задачу, т. к. позволяют добиваться высокого качества очистки. Эта задача важна для Кыргызской республики, особенно для ее курортных зон, где необходимо создавать нормальные условия проживания и отдыха людей.

Компактно расположенные пансионаты, дома отдыха и курорты, каждый из которых должен иметь очистную установку, образуют территориально-распределенную систему объектов. Хотя современные очистные установки допускают высокий уровень автоматизации, полностью исключить обслуживание со стороны ЛПР (лица, принимающего решение) невозможно. Однако для каждой небольшой очистной установки предусматривать ЛПР нецелесообразно. Возможное решение этой задачи состоит в том, что для нескольких очистных установок следует предусмотреть одно ЛПР и для него организовать пункт сбора информации, условно назвав его локальным пунктом управления (ЛПУ). Здесь информация не только собирается, но и обрабатывается для решения задач контроля и управления. Если принять, что предусмотрен сервер для хранения измерительной информации со всех очистных установок региона - условно центральный пункт управления (ЦПУ), то имеет место иерархическая трехуровневая распределенная система автоматизации очистных установок региона, например части северного побережья озера Иссык-Куль [74,75]. К настоящему моменту накоплен значительный мировой опыт построения подобных систем автоматизации. Такие системы позволяют решать не только традиционный комплекс задач измерения и контроля, управления и сигнализации, но и предоставляют значительные преимущества в хранении, визуализации и дистанционной передаче измерительной и командной информации.

Создание распределенной системы автоматизации требует решения следующих задач: 1) изучение и анализ работы очистной установки; 2) разработка общей концепции организации системы автоматизации; 3) технико-экономическое обоснование системы; 4) синтез системы управления; 5) выбор и компоновка технических средств; 6) разработка и наладка программного обеспечения, в том числе для ПЛК; 7) разработка документации системы автоматизации; 8) монтаж и тестирование системы; 9) принятие в эксплуатацию.

Рассмотрим некоторые этапы создания системы.

Описание процесса и установки. В технической терминологии сточной или отработанной водой называется любая вода, подверженная антропогенному загрязнению, т. е. подвергнутая изменениям со стороны человека. Имеются следующие виды отработанной воды: 1) бытовые стоки; 2) промышленные стоки; 3) сельскохозяйственные стоки; 4) ин-фильтрационные стоки; 5) стоки атмосферных осадков.

К бытовым сточным водам (БСВ) относится вода, порождаемая офисами, жилыми домами и другими помещениями, где имеются люди. Состав бытовых стоков складывается из продуктов человеческих и животных испражнений и вод, получающихся в результате мытья, купания, стирки и пищевого приготовления. В состав сточных вод входят болезнетворные агенты, оксифильные субстанции, растворимые неорганические вещества и соединения, органические компоненты, отложения и взвешенные частицы, питательные вещества и растворимые в воде радиоактивные вещества. Эти загрязнения трудноопределяемы из-за отсутствия для многих из них датчиков, а лабораторные методы обнаружения должны быть высокоточными, т. к. загрязнения имеют низкие концентрации. Поэтому для оценки качества воды используют также другие критерии, в частности, физико-химические свойства сточных вод, которые могут быть обнаружены датчиками: температура, цвет, запах, кислотность (рН), биологическая потребность в кислороде (БПК), химическая потребность в кислороде (ХПК), полный органический углерод (ПОУ), концентрации твердых частиц, растворенного кислорода, токсичных и питательных веществ, углерода, азота и фосфора.

Технологический процесс работы очистных сооружений и установок в классическом варианте состоит из следующих этапов: 1) механическая очистка; 2) биологическая очистка; 3) обработка коагулянтами; 4) удаление азотсодержащих соединений; 5) рекарбонизация и осаждение; 6) фильтрация; 7) адсорбционная очистка; 8) хлорирование. При этом теоретически БСВ доводится до состояния питьевой воды, однако требуются большие очистные сооружения с занимаемой площадью до нескольких десятков гектаров.

Есть малые очистные сооружения с требуемой площадью всего до нескольких десятков квадратных метров, которые работают на SBR-технологиях [74,75]. Их часто называют очистными установками. К их числу относится семейство **Kombiblock** фирмы SI Kammler. Установка (рис. 4.5.1) имеет размеры в диаметре 2-2,8 м., в длину 9 – 16 м. и предназначена для биологической обработки БСВ. SBR

(Sequential Batch Reactor – реактор последовательной пакетной загрузки) – технология имеет периодические последовательные фазы работы: 1) наполнение; 2) отложение осадка; 3) очищение в плавающем желобе. На рис. 4.5.2а дан продольный разрез, а на рис. 4.5.2б - схематичное представление установки Kombiblock.

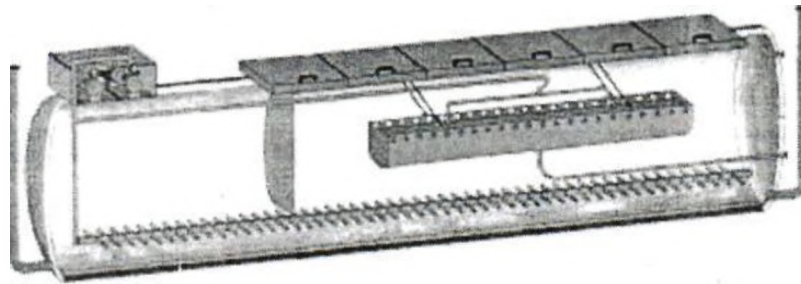


Рисунок 4.5.1 Очистная установка Kombiblock 100 - 2.000 EGW/P.

Бытовая сточная вода (БСВ) попадает первоначально в устройство предварительной механической очистки и далее - свободным течением в устройство Kombiblock. БСВ аэрируются (вентилируются), смешиваясь при этом с активным илом. Далее следует осадка и очистка в специальном плавающем желобе - центральной часть SBR установки. У желоба есть два танка стимула, которые могут быть заполнены водой или опорожнены при помощи сжатого воздуха через клапан так, что можно управлять положением желоба на поверхности воды. Есть вентиляционные шланги с тонко-пузырьчатой продувкой для аэрации, воздух в которые подается компрессором. Соображения безопасности и надежности требуют резервирования компрессора. Активированный отстой находится как осадок в основании контейнера. Поступающие БСВ вентиляруются в течение определенного времени через массу скопления активного ила. Отстой размешивается воздушными пузырями. При выключении вентиляции воздух из танков удаляется и желоб опускается в течение 30 минут так, что в конце этого процесса его отверстия приблизительно на 5 сантиметров ниже поверхности воды. Очищенная БСВ течет через желоб и шланг в водный коллектор. Приблизительно после 1- 1/2 часа резервуар SBR полупуст и процесс заполнения может начаться снова. Полный цикл длится приблизительно 24 часа. Водный приток закрыт, когда ком-

прессоры выключены. При достижении желобом нижнего положения аэрация снова включается, поступает новая порция БСВ, желоб поднимается. Очищенную воду можно сохранять в коллекторе, иначе необходим маленький бассейн. В зависимости от количества поступающей БСВ отстой растет со скоростью 1 - 2 м. в день. Отстой должен быть удален приблизительно через 3 недели.

а)



б)

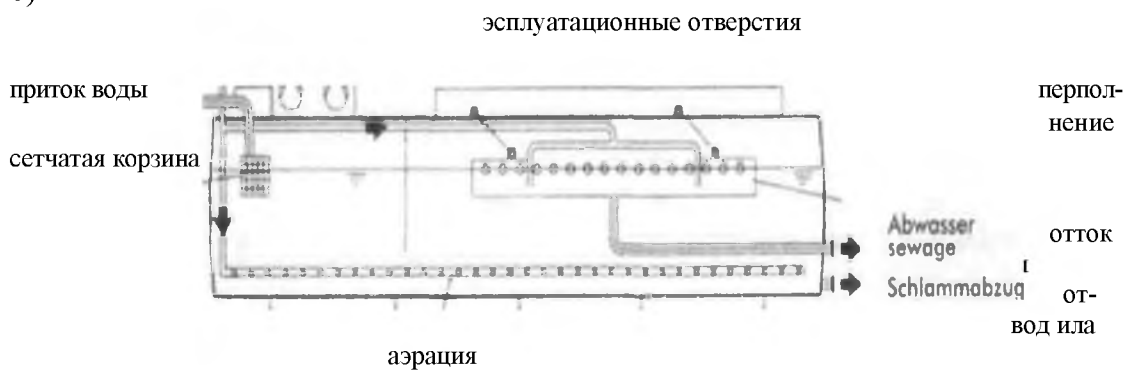


Рис. 4.5.2. Очистная установка Kombiblock: разрез и схема.

Анализ работы очистной установки. Очистка является сложным динамическим процессом из-за изменчивости состава и концентрации БСВ и зависит от множества трудно измеряемых переменных. Математические модели и компьютерное моделирование являются важными, чтобы описать, предсказать и управлять сложными взаимодействиями процессов. При этом роль существенных переменных технологического процесса значительна.

Переменные, определяющие работу объекта, можно разделить на следующие группы: 1) контролируемые и управляемые переменные $\vec{u}^T = [u_1, \dots, u_k]$; 2) контролируемые, но неуправляемые переменные $\vec{z}^T = [z_1, \dots, z_l]$; 3) неконтролируемые и неуправляемые переменные $\vec{f}^T = [f_1, \dots, f_q]$; 4) выходные переменные $\vec{y}^T = [y_1, \dots, y_n]$. Выделены следую-

щие переменные. Входные контролируемые и управляемые переменные: u_1 - количество поступающих в резервуар БСВ; u_2 - концентрация кислорода; u_3 - время очистки; u_4 - температура. Входные контролируемые, но неуправляемые переменные: z_1 - концентрация загрязнений; z_2 - состав загрязнений; z_3 - концентрация фосфора; z_4 - концентрация азота. Выходные переменные: y_1 - количество возвратного активного ила; y_2 - влажность активного ила; y_3 - кислотность pH; y_4 - БПК; y_5 - БПК; y_6 - ПОУ.

Иерархическая система автоматизации. Необходимо решить вопрос о средствах приема-передачи информации между очистными установками (ОУ), ЛПУ и ЦПУ. Возможные варианты: 1) отдельная проводная телеметрическая линия связи; 2) проводная телефонная линия связи; 3) беспроводная линия связи GSM стандарта; 4) радиоканал. Применимость каждого из них определяется экономичностью, рельефом местности, удаленностью ОУ между собой и от ЛПУ. В табл. 1 приведены характеристики линий связи.

Таблица 4.5.1

Вид протокола	Преимущества	Недостатки
Телефонная линия (ISDN)	Хорошая помехоустойчивость, простая адресная реализация, широкая распространённость, низкая стоимость.	Зависимость от поставщика услуг связи, ограниченная мобильность
GSM GPRS модем	Высокая помехоустойчивость, простая адресная реализация, высокая мобильность, широкая зона охвата	Зависимость от поставщика услуг связи, высокая стоимость
Ethernet, Profi-Bus, ModBus	Высокая помехоустойчивость, независимость от поставщика услуг связи, простая адресная реализация, высокая скорость (до 1 Гб/с)	Низкая мобильность (проводной тип связи), ограниченная дальность, высокая стоимость
RS-485	Хорошая помехоустойчивость, независимость от поставщика услуг связи, универсальная аппаратная реализация	Низкая мобильность (проводной тип связи), ограниченная дальность, сложность адресной реализации с высокой вероятностью конфликтов
Пакетный радиоканал	Средняя помехоустойчивость, независимость от поставщика услуг связи, высокая мобильность, низкая стоимость, широкая зона охвата	Сложная адресная реализация с высокой вероятностью конфликтов, сложность аппаратно-программной реализации.

Проводная телеметрическая линия связи (Ethernet, ProfiBus, ModBus, RS-485) из-за высокой стоимости не рекомендуется к использованию.Packetный радиоканал связи не обеспечивает достаточную защиту информации от искажений. Наиболее подходящими линиями являются телефонная линия и GSM/GPRS линия. Учитывая сравнительно плохое состояние телефонных линий в периферийных регионах предпочтение следует отдавать стандарту сотовой связи.

Каждая очистная установка должна иметь локальную систему автоматики (ЛСА) в составе: ПЛК, средства визуализации, обычные средства автоматики и средства телекоммуникаций (рис. 4.5.3). Задачи ЛСА: 1) измерение, первичная обработка и контроль существенных параметров ОУ; 2) хранение информации; 3) управление ОУ; 4) визуализация и сигнализация; 5) выгрузка информации в ЛПУ(в нормальном режиме – каждые 10 мин., в аварийной и предаварийной ситуации– в режиме **on line**); 6) журнал событий.

Аппаратное обеспечение: 1) ПЛК с блоками питания, центрального процессора, памяти, ввода-вывода аналоговых величин, ввода-вывода дискретных величин и функциональными блоками, а также пультом оператора; 2) GPRS модем, который может и не входить в комплектацию ПЛК; 3) средства автоматизации; 4) устройство программирования ПЛК.

Программное обеспечение: 1) загруженные в ПЛК программы приема и первичной обработки измерительной информации; 2) загруженные в ПЛК программы контроля, визуализации и управления; 3) библиотека готовых загрузочных модулей, которая хранится в устройстве программирования ПЛК.

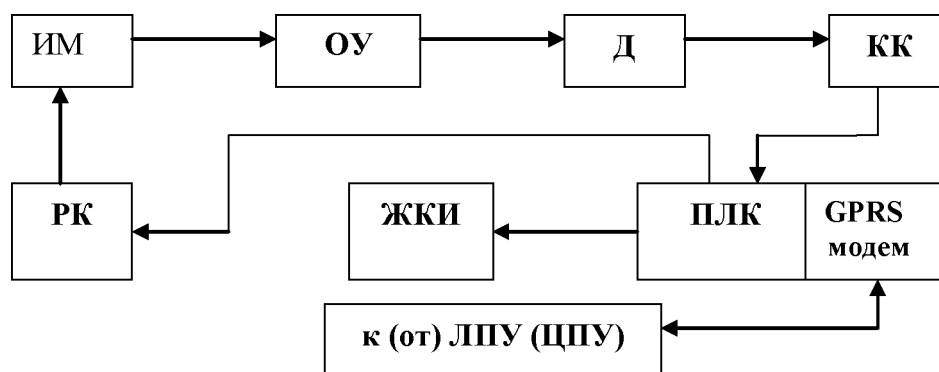


Рисунок 4.5.3 Схема местной автоматики: ОУ-очистная установка; Д-датчики; ИМ-исполнительные механизмы; КК-коммутатор каналов; РК-распределитель каналов; ЖКИ-жидкокристаллический индикатор (панель оператора).

Локальный пункт управления (ЛПУ) предназначен для выполнения задач контроля и управления группы очистных установок с удалением до 15-20 км и состоит из персонального компьютера, ПЛК с двумя GPRS модемами с SIM картами (рис. 4.5.4). В задачи ЛПУ входят: прием на хранение информации от системы автоматики ОУ; визуализация данных, в том числе в виде таблиц и графиков; выработка и выдача команд управления на ОУ (по необходимости); ведение журнала событий; связь с ЦПУ. Аппаратурное обеспечение: ПЛК с блоками питания, центрального процессора, памяти; GPRS модемы; персональный компьютер (ПК) с Интернет-линией. Программное обеспечение: библиотека загрузочных модулей ПЛК; стандартное программное обеспечение ПК; инструментальный комплекс проектирования и программирования систем автоматизации с ПЛК Simatic STEP 7; инструментальный комплекс проектирования иерархических систем автоматизации WinCC flexible.

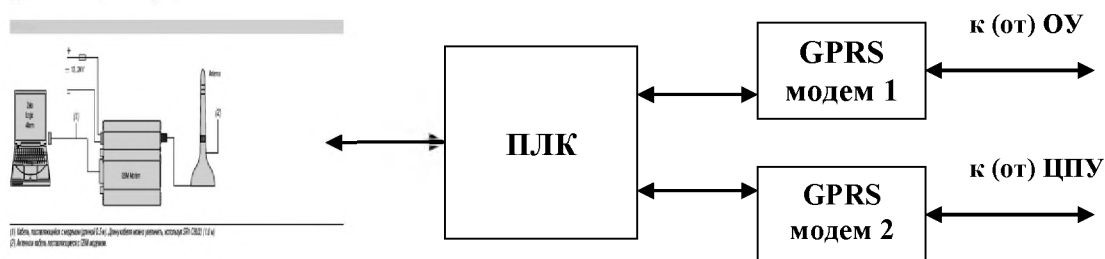


Рисунок 4.5.4 Локальный пункт управления.

Верхний уровень системы автоматизации - центральный пункт управления (ЦПУ) служит для координации, в том числе на организационном уровне, работы всей сети ОУ региона и организуется по принципу "клиент-сервер" (рис. 4.5.5).

Аппаратурное обеспечение: 1) серверная станция с выделенной Интернет-линией; 2) GPRS модемы. Программное обеспечение: 1) расширенная библиотека загрузочных модулей ПЛК; 2) стандартное сетевое программное обеспечение; 3) инструментальный комплекс проектирования и программирования систем автоматизации с ПЛК Simatic STEP 7; 4) инструментальный комплекс проектирования иерархических систем автоматизации WinCC flexible; 5) программные комплексы моделирования и оптимизации.

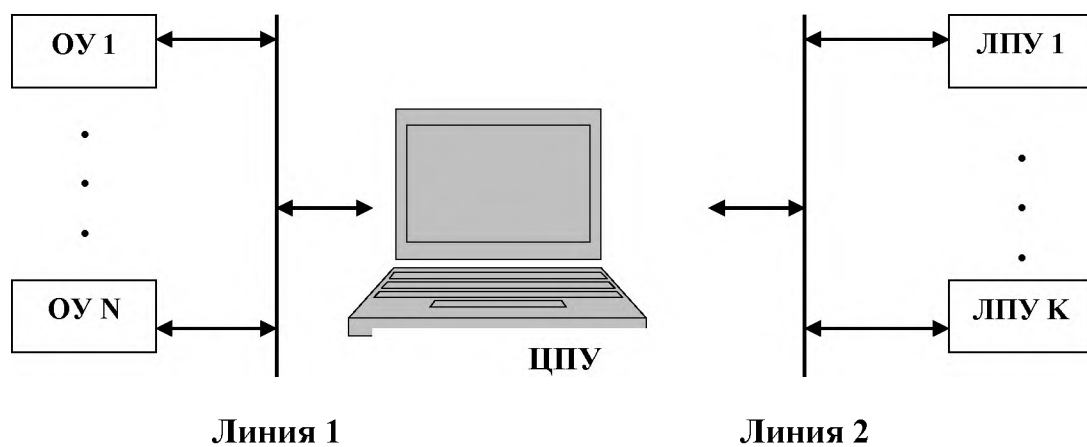


Рисунок 4.5.5 ЦПУ: ОУ 1... ОУ N – очистные установки.

5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

5.1. Классификация технических средств САУ

САУ состоят из отдельных, связанных между собой элементов, каждый из которых предназначен для автоматического качественного или количественного преобразования воздействия от предыдущего элемента (звена) и передачи его последующему.

Любой элемент САУ можно рассматривать как некоторый преобразователь, на вход которого подается величина u , а с выхода снимается сигнал y (рис.5.1.1).



Рисунок 5.1.1

Связь между величинами u и y определяется зависимостью

$$y = f(u), \quad (5.1.1)$$

которая называется градуировочной характеристикой и может быть линейной или нелинейной. Свойства элементов САУ представляются с помощью общих характеристик, таких как:

- 1) чувствительность;
- 2) порог чувствительности;
- 3) коэффициент преобразования;
- 4) погрешности;
- 5) характеристики динамического режима.

Различают статический и динамический коэффициенты передачи. Статический коэффициент преобразования равен

$$k_c = \frac{y}{u}, \quad (5.1.2)$$

а динамический коэффициент преобразования находится как

$$k_d = \frac{\Delta y}{\Delta u} \approx \frac{dy}{du}. \quad (5.1.3)$$

Коэффициент преобразования называется применительно к дат-

чику - коэффициентом чувствительности, а к усилителю - коэффициентом усиления.

Погрешностью называется отклонение выходной величины y от истинного (расчетного или градуировочного) ее значения в результате изменения внутренних свойств элемента или внешних условий его работы. Различают абсолютную, относительную, приведенную относительную погрешности.

Абсолютной погрешностью Δy называется разность между полученным (измеренным) значением выходной величины \hat{y} и y её расчетным значением y :

$$\Delta y = y - \hat{y}.$$

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к расчетному значению выходной величины, выраженное в процентах:

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100\%.$$

Приведенной относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к максимальному значению выходной величины, определяющему диапазон её изменения:

$$\xi_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%.$$

Эта величина, в частности, определяет класс точности прибора.

Порогом чувствительности называется минимальное по абсолютной величине отклонение входной величины элемента, вызывающие заведомые (заметные) изменения выходной величины.

Технический элемент САУ - это средства получения, преобразования, передачи, регистрации и отображения информации, аналоговые и цифровые управляющие устройства, исполнительные механизмы, рабочие органы.

К средствам получения информации относятся чувствительные элементы, первичные измерительные преобразователи, нормирующие преобразователи и вторичные преобразователи.

Элемент, преобразующий, контролируруемую или регулируемую величину в выходную величину, удобную для передачи на расстояние или дальнейшую обработку, называется чувствительным элементом.

Измерительный преобразователь превращает выходной сигнал чувствительного элемента в выходную физическую величину: пере-

мещение, усилие, сопротивление, ток, напряжение и т.д.

Измерительный преобразователь и чувствительный элемент часто представляют конструктивно единое изделие, которое называется первичным измерительным преобразователем (ПИП).

Нормирующий преобразователь (НП) преобразует выходной сигнал ПИП (естественный сигнал) в унифицированный (нормированный) сигнал. Естественный сигнал—это сигнал, вид и диапазон изменения которого определяется физическими свойствами преобразователя и диапазоном изменения измеряемой величины. Унифицированный сигнал—это сигнал, у которого вид носителя информации и диапазон его изменения не зависят от вида измеряемой величины, метода измерения, диапазона изменения измеряемой величины, а определяется только характеристиками НП.

Вторичный преобразователь (ВП) осуществляет индикацию, контроль и запись измеряемых величин и работают в комплекте с измерительными преобразователями. К ВП относятся показывающие приборы, милливольтметры, автоматические потенциометры, автоматические мосты и т.п.

По роду используемой вспомогательной энергии носителя сигналов технические средства САУ делятся на:

- а) электрические;
- б) пневматические;
- в) гидравлические;
- г) комбинированные (электропневматические, электрогидравлические).

Могут быть использованы и другие виды энергии носителей сигналов: акустическая, оптическая, механическая и т.д. Существуют устройства, не использующие вспомогательной энергии - приборы и регуляторы прямого действия. Устройства, питающиеся энергией одного рода, образуют единую структурную группу или ветвь системы автоматизации.

САУ, основанные на электрической ветви имеют преимущества по чувствительности, точности, быстродействию, дальности связи, обеспечивают высокую схемную и конструктивную унификацию приборов. Применение ИС, БИС и СБИС способствует: 1) уменьшению габаритов и веса; 2) минимизации потребления энергии; 3) повышению надежности; 4) расширению функциональных возможностей; 5) применению современных прогрессивных технологий; 6) ор-

ганизации связи контрольно-измерительных приборов непосредственно с УВМ.

Приборы пневматической ветви используются в легковоспламеняемых, взрывоопасных и агрессивных средах, т.е. обеспечивают системе свойства безопасности и надежности. Уступают средствам электрической ветви по быстродействию и дальности связи.

Технические средства гидравлической ветви позволяет получать точные перемещения исполнительных механизмов при больших перестановочных усилиях рабочих органов.

По характеру выполняемых функций технические средства образуют следующие классы:

- а) устройства получения информации;
- б) устройства преобразования информации;
- в) устройства использования командной информации: усилители; исполнительные механизмы;
- г) регулирующие органы.

5.2. Агрегатные комплексы технических средств

Агрегатные комплексы (АК) составляет техническую основу для реализации современных САУ в промышленных и непромышленных сферах. АК есть совокупность изделий, взаимосвязанных между собой по функциональному назначению или области применения, конструкции, основным параметром и техническим данным. АК содержит технически и экономически обоснованную номенклатуру изделий, созданных на единой конструктивной, элементной и технологической базе, с использованием блочного принципа построения на основе базовых моделей и обеспечивает решение всех функциональных задач, соответствующих назначению комплекса. Рассмотрим основные понятия и определения.

Приборы и средства автоматизации - совокупность технических средств для измерения и автоматизации. Средства измерения и автоматизации предназначены для восприятия, преобразования и использования информации для контроля, регулирования и управления. К ним относятся в частности:

- чувствительные элементы, датчики и преобразователи;
- вторичные приборы и индикаторы;
- регуляторы, задатчики, исполнительные механизмы;

- программируемые контроллеры и УВМ;
- релейно-контактные устройства;
- функциональные и логические электрические устройства;
- источники питания.

Системы автоматизации и управления (САУ) - это системы комплексной автоматизации, предназначенные для автоматизации функций сигнализации, контроля, управления и визуализации в промышленной и непромышленной сферах. Подсистемами САУ по функциональному признаку являются:

- 1) системы автоматического управления;
- 2) системы автоматического контроля,
- 3) системы автоматического аварийного управления;
- 4) системы автоматической сигнализации;
- 5) системы отображения информации (визуализации).

Системы сигнализации могут быть интегрированы в системы визуализации. Структура системотехнических основ построения и развития агрегатных комплексов базируется на следующих принципах и методах:

- агрегатирования;
- унификации;
- минимизации номенклатуры;
- формирования гибких компонентов системы;
- реализации в изделиях рациональных эстетических и эргономических требований.

Принцип агрегатирования подразумевает, что наращивание и видоизменение отдельных устройств и создание на их основе САУ осуществляется за счет сочленения унифицированных блоков, модулей, комплектных изделий без внесения в них дополнительных конструктивных изменений.

Принцип унификации призван обеспечить информационную, конструктивную, метрологическую, эксплуатационную, программную, энергетическую совместимость сигналов, интерфейсов, несущих конструкций, элементной базы, модулей и блоков.

Совместимость - это возможность автоматического взаимодействия технических средств в заранее предусмотренных их сочетаниях при построении более сложных комплексных устройств и систем без необходимости применения дополнительных изменений используемых средств.

Интерфейс - совокупность технических средств и правил, обеспечивающих взаимодействие устройств цифровой вычислительной системы и (или) программ.

Принцип минимизации номенклатуры предполагает максимальное удовлетворение потребностей объектов экономической деятельности в технических средствах на основе разработки и выпуска агрегатных комплексов и унифицированных комплектов технических средств, устройств одного функционального назначения с учетом того, что типоразмеры этих устройств вписываются в определенным образом заранее организованные для них параметрические ряды.

Формирование гибких компонентов предполагает возможность наращивания и изменений функций систем автоматизации в процессе эксплуатации за счет перестройки структуры и алгоритмов технических средств, входящих в состав САУ.

Реализация рациональных эстетических и эргономических требований проявляется в создании технических средств, отвечающих единому стилю и обеспечивающих максимальные удобства в эксплуатации.

Типовые функции САУ осуществляются аппаратными средствами, иерархическая структура которых дана на рис.5.1.2.

Средства получения информации и средства воздействия на процесс предназначены для непосредственного взаимодействия с ОУ. Они обеспечивают информацией все вышеразположенные в иерархической структуре средства, и осуществляет передачу управляющего воздействия на ОУ.

Средства локального контроля и регулирования предназначены для построения одноконтурных систем контроля и регулирования простых объектов и систем автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объектов. Эти средства, как правило, выпускаются в составе параметрических рядов и унифицированных комплектов, создаваемых на основе базовых моделей.

Средства централизованного контроля и регулирования предназначены в основном для построения технического обеспечения систем автоматизации объектов, имеющих несколько сотен контролируемых и регулируемых параметров.

Технические средства 4-уровня предназначены для построения УВК, позволяющих реализовать сложные алгоритмы управления объектом.

В настоящее время продолжают работы по разработке агрегатных комплексов технических средств многопланового применения.

Унифицированный сигнал (УС) - это сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами, обеспечивающий информационное сопряжение (интерфейс) между блоками, приборами и установками САУ. Под унифицированным параметром УС понимается тот его параметр, который является носителем информации, а именно: значение постоянного или переменного тока или напряжения, или частоты, код, давление воздуха пневматического сигнала.



Рис.5.1.2 Иерархическая структура технических средств САУ.

В зависимости от вида унифицированных параметров применяют унифицированные сигналы 4-х групп:

- 1) электрические непрерывные сигналы тока и напряжения;
- 2) частотные электрические непрерывные сигналы;
- 3) электрические кодированные сигналы;
- 4) пневматические сигналы.

Каждая группа сигналов определяется соответствующим государственным стандартом. В качестве примера в табл. 5.1.1 приведены основные виды унифицированных аналоговых сигналов.

Таблица 5.1.1

Электрические сигналы				Пневм. сигнал, кПа
Постоянный ток, мА	Постоянное напряж., мВ	Переменное напряж., В	Частота, кГц	
0-5;	0-10	0-2	0-8;	20-100
(-5)-0-(+5)	(-10)-0-(+10)	(-1)-0-(+1)	2-4;	
0-20	0-20; 0-50;		4-8;	
(-20)-0-(+20)	0-1000;		0-100	
4-20	0-5000;			
	0-10000;			
	(-1000)-0-(+1000)			

Электрическая ветвь агрегатных комплексов. Технические средства электрической ветви по функциональному назначению разделяются на шесть классов (групп). Классификация на шесть функциональных групп объясняется возможным использованием средств этих групп в типовых САУ ТП. Поэтому устройства представления информации оператору отнесены к изделиям центральной части, а устройства для приема, преобразования и передачи по каналам связи представлены двумя группами: группой устройств преобразования информации для передачи по каналам связи и группой устройств преобразования и передачи команд управления. Ниже дана классификация электрической ветви технических средств.

1. Устройства получения информации:

- ◆ первичные преобразователи (датчики);
- ◆ измерительные (нормирующие) преобразователи.

2. Устройства преобразования информации (для передачи по каналам связи):

- ◆ преобразователи для кодирования сигналов;
- ◆ преобразователи для декодирования сигналов;
- ◆ электропневмопреобразователи;
- ◆ электрогидропреобразователи.

3. Устройства преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления (центральная часть САУ):

- ◆ анализаторы, регистрирующие приборы;
- ◆ вторичные приборы, блоки памяти;
- ◆ регуляторы, устройства ввода-вывода;
- ◆ функциональные преобразователи, программные задатчики;
- ◆ программируемые контроллеры, типовые микропроцессорные установки;
- ◆ управляющие вычислительные машины (промышленные компьютеры).

4. Устройства преобразования и передачи по каналу связи команд управления:

- ◆ преобразователи для кодирования сигналов;
- ◆ преобразователи для декодирования сигналов;
- ◆ электропневмопреобразователи;
- ◆ электрогидропреобразователи.

5. Устройства использования командной информации:

- ◆ усилители мощности;
- ◆ исполнительные механизмы.

6. Регулирующие органы:

- ◆ для твердых тел;
- ◆ для сыпучих тел;
- ◆ для жидких и газообразных сред;
- ◆ для потоков электроэнергии.
- ◆ для потоков сжатого воздуха и гидроэнергии.

5.3 Устройства получения информации

Любая система автоматического управления независимо от своего назначения имеет устройство сравнения (различитель), без которого невозможно реализовать отрицательную обратную связь. Устройство сравнения (вычитающее устройство) - это элемент, дающий сигнал ошибки на основании сравнения сигналов ходного и обратной связи. Одновременно с операцией вычитания различитель может и усиливать сигнал. На структурных схемах он изображается так, как показано на рис.5.3.1. На входы различителя поступают задающий сигнал $g(t)$ и сигнал обратной связи $x_{oc}(t)$, а на выходе формируется сигнал

$$\varepsilon(t) = k[g(t) - x_{oc}(t)], \quad (5.3.1)$$

где k - постоянный коэффициент преобразования.

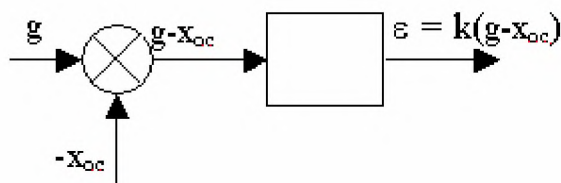


Рисунок 5.3.1 Структурная схема устройства сравнения.

В соответствии с функциями, которые выполняют устройства сравнения их, часто называют устройствами измерения. К схемам устройств сравнения предъявляются следующие требования: 1) высокая чувствительность, которая не должна зависеть от значения и закона изменения регулируемой величины; 2) высокая точность измерений; 3) малое потребление энергии, в связи с чем схема устройства сравнения электрической системы обычно имеет высокое входное сопротивление. Мощность выходного сигнала должна быть большой, т. е. устройство должно иметь высокий КПД; 4) быстродействие схемы должно обеспечивать хорошее слежение за изменением измеряемой величины; 5) зона нечувствительности схемы должна быть минимальной.

В системах автоматики применяются механические, электромеханические и электрические устройства сравнения. Последние по принципу построения делятся на три группы: 1) устройства, выполненные на линейных элементах (например, резисторах); 2) устройства, выполненные на нелинейных элементах (L- и C - элементах, по-

лупроводниках); 3) регенеративные схемы, являющиеся сочетанием измерительного устройства с преобразователем электрического сигнала одного вида в другой.

В качестве устройства сравнения часто применяются четырёх-плечие мосты (рис.5.3.2). В три плеча этого моста включены известные сопротивления z_1 , z_2 и z_3 , а в четвертое - сопротивление датчика z_D . Сопротивления плеч моста могут быть активными и реактивными. Измерительные мосты работают как на постоянном, так и на переменном токе. Когда сопротивление датчика таково, что выполняется условие

$$z_D z = z_1 z_2, \quad (5.3.2)$$

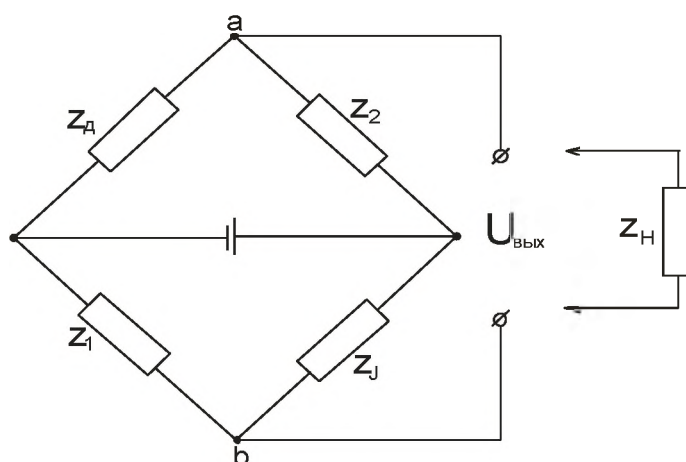


Рисунок 5.3.2 Мостовая схема устройства сравнения.

то потенциалы точек a и b равны и выходное напряжение равно нулю ($U_{вых} = 0$). Условие (5.3.2) является условием равновесия моста. Если регулируемая величина не равна заданной, то условие (5.3.2) не выполняется и на выходе моста появляется напряжение $U_{вых}$, которое используется в системе для целей управления.

Чувствительность мостовой схемы по току

$$\eta_i = \left| \frac{dI_H}{dz_H} \right|_{I_H \rightarrow 0}, \quad (5.3.3)$$

где I_H - ток в нагрузке z_H .

Чувствительность по напряжению

$$\eta_u = dU_{вых} / dz_D \quad (5.4.4)$$

Передаточная функция моста определяется характером сопро-

тивлений плеч. В случае активных сопротивлений элемент сравнения считается безынерционным, т. е. его передаточная функция $W(s) = k$. В том случае, когда в системе автоматики информация передается путем изменения какого - либо из параметров электрического сигнала (уровня напряжения или тока, амплитуды, фазы или частоты гармонических колебаний), используется соответствующий тип различителя (различитель уровня, фазы или частоты).

Различитель уровня предназначен для измерения разности двух входных напряжений. Разность напряжений можно измерить используя электромагнитное устройство (например, трансформатор или магнитный усилитель). На рис 5.4.3а показан различитель, выполненный по схеме трансформатора. Выходное напряжение пропорционально разности входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = k_{mp} (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}), \quad (5.4.5)$$

где k_{mp} - коэффициент трансформации.

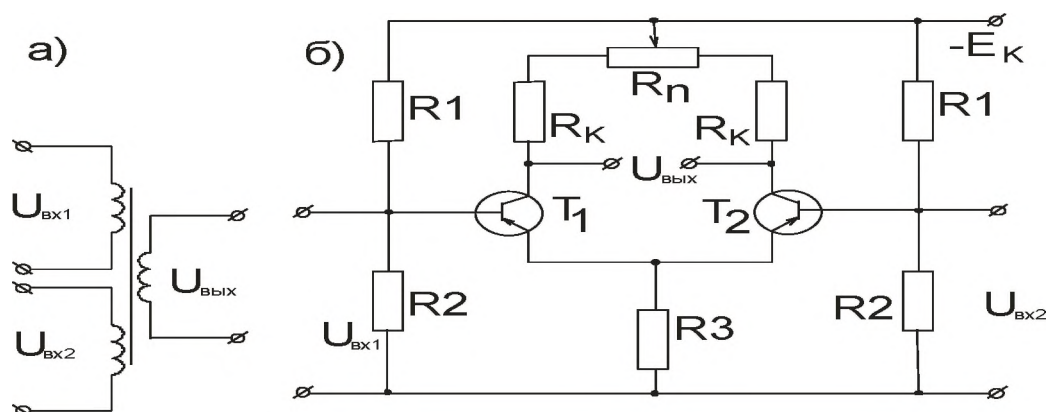


Рисунок 5.3.3 Схемы различителей уровня на трансформаторах (а) и на транзисторах (б).

Широко используются также сравнивающие устройства, построенные на двух лампах или транзисторах. На рис. 5.4.3б изображен параллельно - балансный каскад, применяемый в качестве различителя. Схема выполнена на двух транзисторах T_1 и T_2 . Делители напряжения R_1 , R_2 задают начальные смещения на базы триодов T_1 и T_2 , а их эмиттеры включены через сопротивление R_3 . Для того чтобы выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ было равно нулю при отсутствии входных сигналов $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ или при их равенстве, источник питания E_k подключают к коллекторным сопротивлениям R_k каскада через перемен-

ное сопротивление R_n . В этих каскадах практически отсутствует дрейф, а коэффициент усиления значительно выше, чем в одноканальных усилителях. Напряжение на выходе

$$U_{\text{вых}} = k_u (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}), \quad (5.4.6)$$

где - k_u коэффициент усиления по напряжению.

Чувствительные элементы, преобразующие контролируемую или регулируемую величину в выходной сигнал, удобный для дистанционной передачи или дальнейшей обработки, называют **датчиками**. Обычно в системах автоматического управления для передачи информации используются электрические сигналы. Поэтому широко применяются датчики, преобразующие неэлектрические сигналы в электрический. Датчики могут классифицироваться по назначению: датчики температуры, давления, уровня, линейных и угловых перемещений, состава веществ, оптических величин и т. п. Возможна классификация и по параметру датчика, изменяющемуся в результате преобразования измеряемой величины, - датчики активного сопротивления, емкостные, индуктивные и т.п.

Датчики активного сопротивления (резисторные датчики).

Принцип действия резисторных датчиков основан на изменении их электрического сопротивления R при изменении длины l , площади сечения S или удельного электрического сопротивления ρ . Сопротивление датчика

$$R = \rho l / S, \quad (5.3.7)$$

где R - сопротивление, Ом; ρ - удельное электрическое сопротивление материала проволоки, Ом·м; l - длина проводника датчика, м; S - площадь сечения, м².

Основной характеристикой такого датчика, измеряющего перемещение, является зависимость сопротивления от перемещения, т.е. $R = f(l)$. При этом чувствительность η датчика

$$\eta = dR / dl = \rho / S. \quad (5.3.8)$$

Такие датчики могут работать в цепях постоянного и переменного тока. Разновидностью резисторных датчиков являются потенциометрические датчики и тензорезисторы (или тензодатчики).

Потенциометрические датчики используют в системах автоматического управления (САУ) для измерения угловых и линейных перемещений. На рис. 5.4.4 показана схема датчика линейного перемещения. Измеряемая величина x преобразуется в перемещение движка

потенциометра, которому соответствует выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Потенциометрические датчики используют в схемах на постоянном и переменном токе. Конструктивное исполнение датчиков различно.

Переменные резисторы выполняются из обмоточного провода, металлических пленок, полупроводниковых материалов. Широко применяются потенциометры непрерывной намотки. Их каркас выполняется плоским или цилиндрическим в случае преобразования поступательных перемещений и кольцевым для преобразования угловых перемещений. В качестве обмоточного провода используется материалы с высоким удельным электрическим сопротивлением (манганин, константан, нихром). Для повышения износоустойчивости провода применяются сплавы из благородных металлов: платина с иридием, платина с палладием. Диаметр намоточного провода выбирается по требуемой точности и сопротивлению. Так для высокого класса точности диаметр провода 0,03- 0,1, а для низкого класса точности 0,3- 0,4 мм. Обмоточный провод датчика покрывают слоем эмали или окислов.

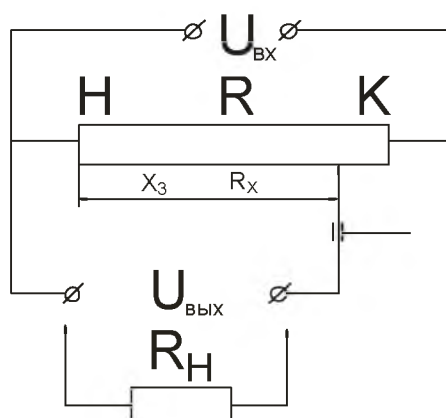


Рисунок 5.3.4 Схема датчика линейного перемещения.

Подвижный токосъемный контакт, выполненный в виде щетки или движка, изготовляют из сплавов платины с бериллием, серебра или фосфористой бронзы. Он скользит по виткам намотки потенциометра, защищенным в месте соприкосновения от изоляции. Для обеспечения надежной работы датчика усилие на скользящий контакт составляет $(0,5 \div 15) \cdot 10^{-2}$ Н. Основной характеристикой потенциометрического датчика является зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от перемещения x , т. е. $U_{\text{вых}} = f(x)$, которая может быть линейной и не-

линейной. Для потенциометра, изображенного на рис. 5.3.4 зависимость $U_{\text{вых}} = x$ имеет вид

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ex}} a / [1 + (a/\beta)(1-a)] , \quad (5.3.9)$$

где $\alpha = x/l$ - отношение перемещения движка датчика к длине всей катушки; $\beta = R_H / R$ - отношение сопротивления нагрузки к полному сопротивлению потенциометра.

Если сопротивление нагрузки значительно превышает сопротивление потенциометра, т.е. $R_H \gg R$, то

$$U_{\text{вых}} \cong U_{\text{ex}} a = U_{\text{ex}} x/l . \quad (5.3.10)$$

На рис. 5.3.5 показана зависимость относительного изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}/U_{\text{ex}}$ от α при различных значениях коэффициента β .

Чувствительность датчика при малых перемещениях

$$\eta = [dU_{\text{вых}}/dx]_{x=0} = U_{\text{ex}}/l \quad (5.3.11)$$

Проволочные датчики имеют достаточно высокую точность, но их недостатком является ступенчатость характеристики (5.3.9) и (5.3.10) из-за дискретного изменения сопротивления датчика при перемещении щетки (рис. 5.3.6). Ширина ступеньки l_w характеристики (рис. 5.3.6) равна шагу катушки провода, а высота R_l - сопротивлению одного витка. Идеализированной характеристикой $R(x)$ является прямая, проведенная через середины ступенек, при этом абсолютная погрешность или зона нечувствительности

$$\Delta R_H = \pm [R/2w], \quad (5.3.12)$$

где R - сопротивление датчика; w - число витков обмотки датчика.

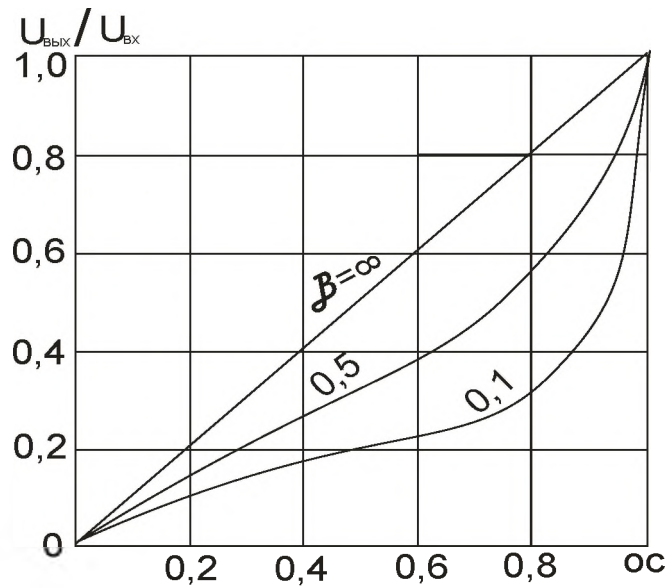


Рисунок 5.3.5 Зависимость выходного напряжения датчика от перемещения.

Относительная погрешность

$$\delta = \pm \Delta R_H / R = \pm [1/(2w)] \quad (5.3.13)$$

Датчик имеет также технологические погрешности. У датчиков высокого класса точности эта погрешность составляет не более 0,01%, а для среднего класса точности – от 0,25 до 0,5%. Динамические свойства потенциометрических датчиков зависят от характера нагрузки. Если нагрузка активная, то датчик эквивалентен безинерционному звену с передаточной функцией

$$W(s) = k = R_x R_H / (r R_x + R R_H), \quad (5.3.14)$$

где R - полное сопротивление потенциометра, Ом; R_x - сопротивление потенциометра между точкой H и движком (см. рис.5.4.4), Ом; r - сопротивление потенциометра между движком и точкой K , Ом.

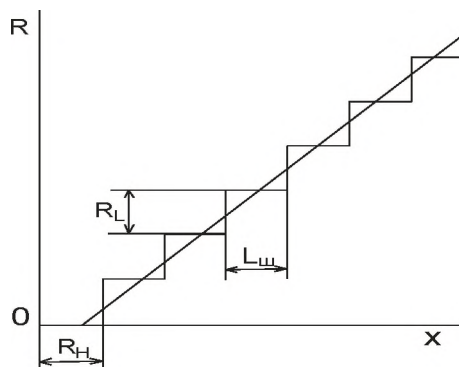


Рисунок 5.3.6. Характеристика датчика.

Если нагрузка реактивная, то датчик эквивалентен апериодическому или форсирующему звену. Например, для индуктивной нагрузки передаточная функция датчика

$$W(s) = k(1 + s\tau)/(1 + sT) \quad (5.3.15)$$

Где $k = R_X R_H / (rR_X + rR_H + R_X R_H)$; $\tau = L_H / R_H$; $T = L_H R / (rR_X + rR_H + R_X R_H)$; L_H - индуктивность нагрузки; R_H - активная составляющая сопротивления нагрузки.

Для измерения сил и деформаций твердых тел в системе автоматики применяются специальные датчики, называемые **тензодатчиками (тензорезисторами или тензометрами)**. Тензометры должны обладать минимальным весом и размерами с тем, чтобы установка тензодатчика не влияла на величину деформации детали. Существуют проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы. Действие проволочных, пленочных или фольговых тензорезисторов основано на изменении сопротивления проволоки, пленки или фольги при их сжатии или растяжении. Значительный прогресс достигнут в изготовлении наклеиваемых фольговых тензорезисторов. Они имеют ряд преимуществ перед проволочным, обеспечивают лучшую теплоотдачу и высокую эффективность использования при наклейке на упругий элемент. Сопротивление фольговых тензорезисторов достигают несколько сотен ом, длина может составлять 3 мм, а толщина - от 0,025 до 0,012 мм. Проволочные тензодатчики основаны на изменении сопротивления проволоки при растяжении или ее сжатии. На полоску бумаги длиной до 25-40 мм наклеивается зигзагообразная тонкая ($d \leq 0,05$ мм) константановая проволока, имеющая медные выводы (рис. 5.3.7).

Тензодатчик прочно наклеивается на испытываемую деталь. При растяжении и сжатии детали в направлении расположения проволоки сопротивление датчика соответственно возрастает или уменьшается. Деформация датчика в направлении, перпендикулярном расположению проволоки, вызывает чрезвычайно малое изменение сопротивления. Благодаря этому тензодатчики дают возможность определять составляющую механического напряжения в детали в данном направлении. Путем наклейки нескольких различно ориентированных датчиков можно получить полную картину распределения механических напряжений.

Тензометры, помимо проволоки, изготавливаются также из тонкой

металлической фольги (толщиной несколько микрон).

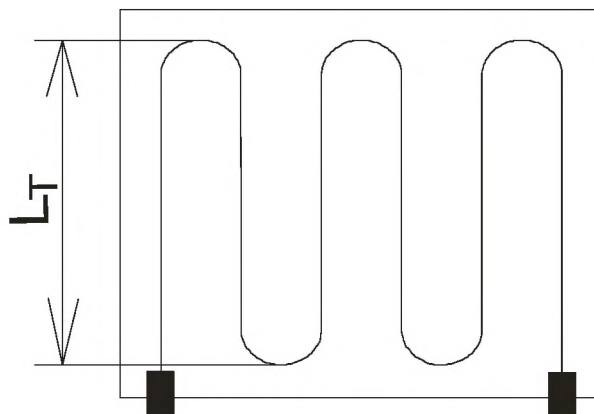


Рисунок 5.3.7.Проволочный тензодатчик.

В последние годы широко используются пленочные тензорезисторы. Технология их изготовления заключается в вакуумной возгонке тензочувствительного материала и последующей его конденсации на основание. В качестве тензочувствительного материала используется как металлические сплавы, так полупроводники. Важным достоинством пленочных и фольговых тензорезисторов является то, что при изготовлении можно получить решетку любого рисунка .

Относительно чувствительность тензорезистора

$$\eta = (\Delta R / R) / (\Delta l / l_T), \quad (5.4.16)$$

где R - сопротивление тензоэлемента, Ом; ΔR - изменение сопротивления, Ом; l_T - длина тензочувствительного элемента, м; Δl - изменение длины датчика, вызванное измеряемой деформацией, м. Тензочувствительные элементы изготавливают из различных сплавов. В табл. 5.3.1 приведены величины относительной тензочувствительности для различных материалов.

Таблица 5.3.1

Материал проволоки	η	Материал проволоки	η
Манганин	0,5	Копель	2,4
Константан	1,9-2,1	Элинвар	3,2-3,5
Эдванс	2,1	Платиноиридий	5,8
Нихром	2,1-2,3	Никель	12,6

Сопротивление тензорезистора составляет обычно 100-200 Ом, измеряемая деформация не превышает 1%. Проволочные тензорезисторы обладают высокой температурной стабильностью.

В качестве полупроводниковых тензорезисторов используют пластины, сделанные из кристаллов германия или кремния, наклеенные на бумажное основание, и с металлическими выводами (рис.5.3.8).

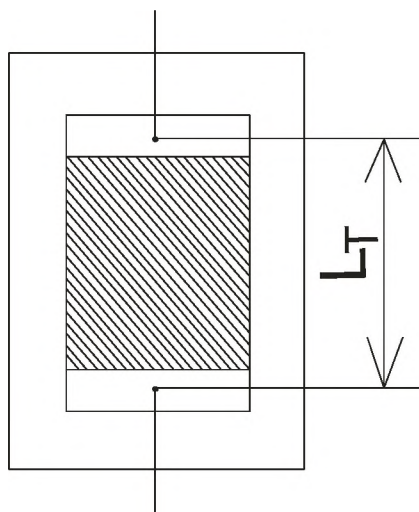


Рисунок 5.3.8 Полупроводниковый тензодатчик.

Длина тензорезистора составляет 5-15мм. Полупроводниковые тензорезисторы по сравнению с проволочными обладают высокой относительной чувствительностью, которая находится в пределах от - 100 до 200. Сопротивление тензорезистора 50 Ом - 5 кОм. Высокое значение относительной чувствительности позволяет снизить требования к усилителям и использовать их для измерения в расширенном диапазоне деформаций при наличии больших электромагнитных помех. Нужно отметить, что разработаны тензодатчики давления модульного типа в виде гибридной интегральной схемы, элементы которой нанесены на поверхность кремниевой пластинки диффузионным способом. Коэффициент чувствительности такого тензодатчика составляет 90, погрешность - 2%. Отметим, что металлические тензорезисторы обладают высокой точностью и стабильностью; они рассчитаны на широкую область применения для динамических измерений в широком диапазоне частот. Измерительным преобразователем для тензорезисторов являются, как правило, делитель напряжения (рис. 5.3.9) или мостовая схема.

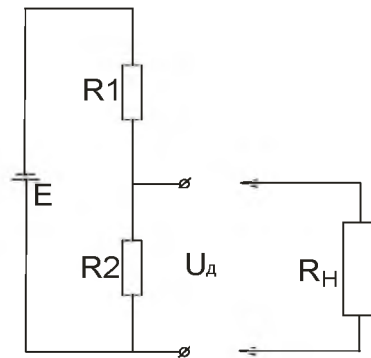


Рисунок 5.3.9. Схема включения тензодатчика.

Цепь делителя R_1 , R_2 питается от источника напряжения E . Выходное напряжение U_d - это напряжение на тензорезисторе, которое подается на нагрузочное сопротивление R_H . В схему моста тензорезистор включается так, как показано на рис. 5.3.2. Динамика тензодатчика представляется безынерционным звеном.

Электротепловые датчики. Электротепловые датчики используются для измерения температуры и других тепловых величин. Они преобразуют изменение температуры в изменение электрической величины: ЭДС или сопротивление. В зависимости от выходной величины делятся на термопары и термосопротивление.

Термопары. Принцип действия термопары основан на термоэлектрическом эффекте, который заключается в следующем. Если спаять концы двух разнородных проводников и нагреть один спаяв, то в цепи термопары появится ЭДС (рис. 5.3.10). Значение ЭДС зависит от материала.

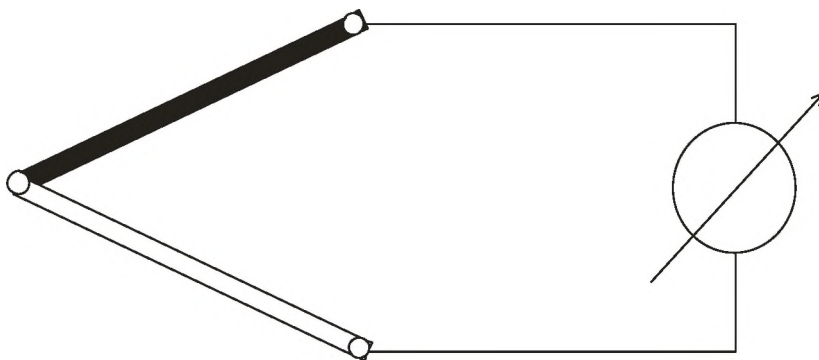


Рисунок 5.3.10 Схематическое изображение термопары.

Для измерения температур в пределах от -200 до 2500°C используются термопары с металлическими термоэлектродами. Для измере-

ния высоких температур (°C) используют следующие термопары из тугоплавких материалов и сплавов:

вольфрам-молибден 1300-2400;

вольфрам-тантал 400-2000;

вольфрам-рений 0-2500;

вольфрам-вольфрам, молибден 1000-2900.

Значение термоЭДС для различных типов термопар составляет от десятых долей до десятков милливольт. Ниже приведены значения термо - ЭДС (мВ) для некоторых типов термопар:

медь – константан от 4,3 (при 100° C) до - 6,18 (при - 260°);

медь - золото - кобальт от 0,86 (при - 20°) до - 9,87 (при - 270°);

вольфрам - молибден до 3,8;

Вольфрам - тантал 20;

Вольфрам - рений 30.

Чувствительность термопар

$$\eta = \Delta E / \Delta t, \quad (5.3.17)$$

где ΔE - изменение термоЭДС, соответствующее изменению температуры на Δt° .

Для разных типов термопар чувствительность различна.

Например, термопара медь - константан при 0° имеет $\eta = 40$ мкВ/град при 260° C, $\eta = 5$, при 260° C $\eta = 1,1$ мкВ/ град; хромель- алюмель имеет чувствительность $\eta = 39$ мкВ/ град при 0°С, $\eta = 13$ мкВ/ град при - 200°С. При понижении температуры чувствительность падает из-за неоднородности термоэлектродов. При включении термопары в схему необходимо предусмотреть автоматическое введение поправки на изменение температуры нерабочих спаев. В цепь термопары включается мост, в одно плечо которого включено термосопротивление R_T , помещенное около нерабочих спаев термопары, диагональ моста питается от источника напряжения E . Если температуры нерабочих спаев повышается, то мост разбалансируется и на выходной диагонали моста появляется ЭДС, корректирующая изменение термоЭДС термодатчика. Недостаток устройства - необходимость использования дополнительного источника питания, изменение напряжения которого вносит в схему дополнительную погрешность. С точки зрения динамики, термопары является инерционным звеном с передаточной функцией.

$$W_{III}(s) = R/(1 + sT). \quad (5.4.18)$$

Постоянное времени T находится в пределах от десятых долей секунды до нескольких минут в зависимости от конкуренций.

Термосопротивление. Более высокую точность измерения температуры получают при использовании термосопротивления. Они выполняются из металлов или полупроводников. Из металлов обычно применяют платину из-за её химической стабильности. Термосопротивления, изготовленные из платины, применяются для измерения температуры от -260 до 1300°C . Для изготовления высокотемпературных термосопротивлений используются родий, иридий, рений, так как они инертны к большинству реагентов и имеют хорошие физические и механические свойства. Для измерения температур среднего диапазона применяют медь, железо, никель.

Для платиновых термосопротивлений зависимость между его сопротивлением и измеряемой температурой в диапазоне 50 - 650°C выражается следующим соотношением:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (5.3.19)$$

где R_t - сопротивление при $t^\circ\text{C}$; R_0 - сопротивление при 0°C ; $A = 3,94 \cdot 10^{-3}$; $B = -5,8 \cdot 10^{-7}$ - постоянные коэффициенты.

Для медных термосопротивлений эту зависимость можно выразить для интервала температур (от -50 до -150°C) линейным уравнением

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.4.20)$$

где $\alpha = 4,25 \cdot 10^{-3}$ - температурный коэффициент электросопротивления, $1/\text{град}$.

Верхний предел измерения термосопротивлениями ограничен, так как при повышенной температуре медь окисляется. Чувствительным элементом термосопротивления является спираль, намотанная без механических натяжений на каркас определённой формы (цилиндрический, крестообразный или пластинчатый) из изоляционного материала. Каркас со спиралью помещают в корпус (металлический или стеклянный). Каналы корпуса промышленных термосопротивлений засыпают порошком окиси алюминия. Некоторые конструкции герметизируют, что позволяет их использовать в работе с жидкостями.

В настоящее время широко применяются полупроводниковые термосопротивления, которые называют термисторами. К ним относятся поликристаллические термисторы из смеси окислов различных

металлов. Производство монокристаллических материалов даст в будущем возможность повысить пределы и точность измерения температуры. Это объясняется тем, что монокристаллы тугоплавких металлов пластичны, не изменяют размеров при повышении температуры, имеют стабильную структуру и свойства и их коэффициент диффузии меньше, чем в поликристаллах. Для довольно широкого класса полупроводниковых терморезисторов характеристика $R_t = f(t)$ описывается формулой

$$R_t = Ae^{-(B/T)}, \quad (5.3.21)$$

где A и B - постоянные; T - температура в градусах Кельвина, K .

Чувствительность термосопротивления определяется температурным коэффициентом электросопротивления α , который вычисляется как относительное приращение сопротивления на единицу температуры:

$$\alpha = \Delta R / (R\Delta t^0) \approx (1/R)(dR/dt). \quad (5.3.22)$$

Полупроводниковые термосопротивления имеют температурный коэффициент примерно на порядок выше металлических, а стабильность значительно хуже. Эти термосопротивления рассматриваются как инерционные звенья, причем их постоянная времени составляет от долей до десятков секунд.

К измерительному преобразователю, например к мостовой схеме, термосопротивления подключаются по трех- или четырехпроводной линии.

5.4 Емкостные и индуктивные датчики

Емкостные датчики. Принцип действия емкостных датчиков основан на преобразовании линейных или угловых перемещений в изменение емкости конденсатора. Емкость C любого плоского конденсатора (рис. 5.4.1) равна

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / \delta, \quad (5.4.1)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды между пластинами; S - площадь перекрытия пластин, м²; δ - зазор между пластинами, м.

Относительная чувствительность плоского емкостного датчика с переменным зазором

$$\eta = \epsilon_0 \epsilon S / \delta^2. \quad (5.4.2)$$

Емкость датчика углового перемещения (рис. 5.4.2)

$$C = \epsilon_0 \epsilon S (1 + 2\alpha/\pi) / \delta, \quad (5.4.3)$$

где S - площадь перекрытия пластин при $\alpha=0$, α - угол поворота пластины.

Чувствительность такого датчика

$$\eta = dC/d\alpha = 2\epsilon_0 \epsilon S / (\pi \delta). \quad (5.4.3)$$

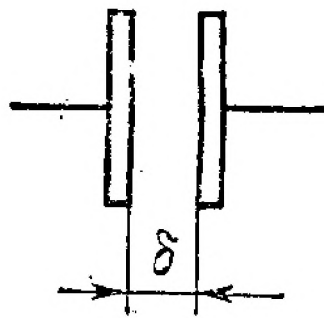


Рисунок 5.4.1.

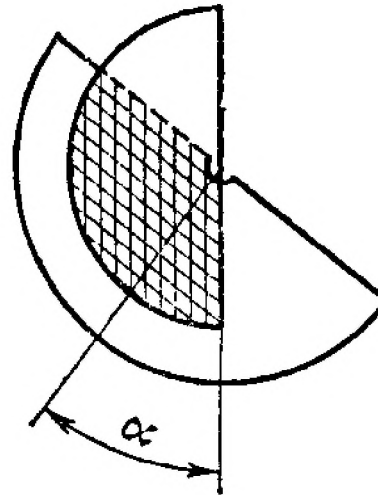
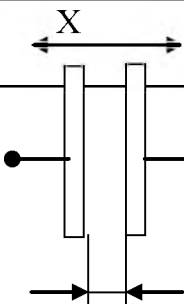
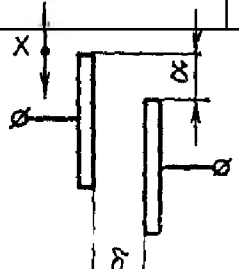
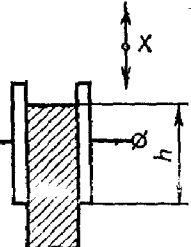
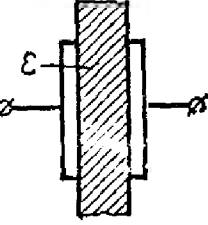


Рисунок 5.4.2.

Из формулы (5.4.1) видно, что емкость датчика можно изменять, изменяя зазор между пластинами, площадь перекрытия пластин или диэлектрическую проницаемость диэлектрика. В таблице 5.4.1 указаны способы построения емкостных датчиков и области их применения. Так как сила взаимодействия между пластинами очень мала, то рассматриваемые датчики находят широкое применение в тех случаях, когда недопустимы большие измерительные усилия. Они удобны для измерения вибраций с высокой частотой.

Таблица 5.4.1

Основные сведения	Вид датчика			
	с переменным зазором δ	с переменной площадью S	с переменным уровнем среды с диэлектрической проницаемостью ϵ	с переменным значением диэлектрической проницаемости ϵ
Конструк-				

тивная схема датчика				
Область применения	δ Измерение малых перемещений; толщины покрытий 0-1 мм; давления	Измерение линейных или угловых перемещений более 1 мм* счет количества изделий	Измерение уровня вещества; защитная сигнализация; счет количества изделий	Измерение температуры t , давления p , напряженности электрического поля; определение диэлектрических свойств веществ; измерение величины радиации

Все емкостные датчики работают на переменном токе повышенной частоты (до 1000 Гц), что является их недостатком, так как усложняется схема из-за необходимости устранения паразитных емкостей. В настоящее время разработаны датчики с переменной площадью, работающие на частоте 500 Гц. Наиболее распространенными измерительными преобразователями для емкостных датчиков являются контурные и мостовые схемы.

Схема включения емкостного датчика в контурную цепь показана на рис. 5.4.3, где LC_d – контур. Емкость C_d образована датчиком и питается от генератора Γ стабильной частоты. Вследствие изменения емкости датчика изменяется напряжение U_k на настроенном контуре.

Дифференциальная схема включения емкостного датчика показана на рис. 5.4.4.

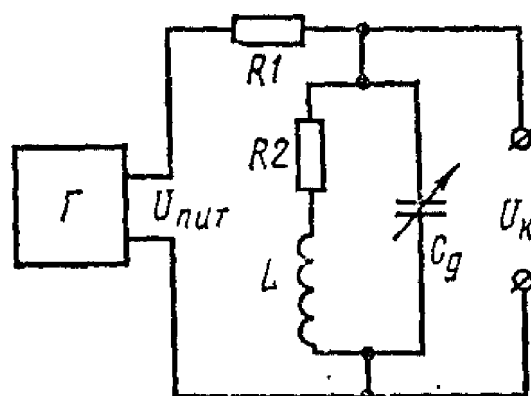


Рисунок 5.4.3 Емкостной датчик в контурной цепи.

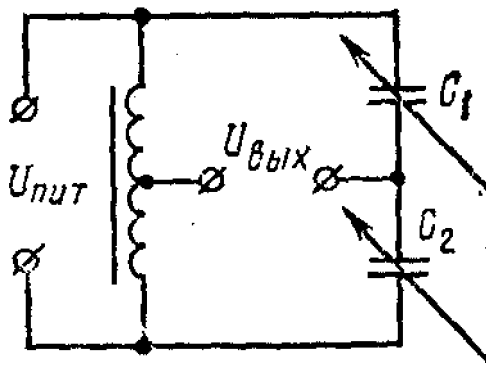


Рисунок 5.4.4 Дифференциальная схема включение емкостного датчика.

Видно, что емкость датчика можно изменять, изменяя зазор между пластинами, площадь перекрытия пластин или диэлектрическую проницаемость диэлектрика. Это дает возможность получить большую чувствительность при компенсации некоторых вредных внешних факторов (например, температуры). Емкости дифференциального датчика $C_1 = C_d + \Delta C$ и $C_2 = C_d - \Delta C$ включаются в соседние плечи моста; в два других плеча включаются или взаимосвязанные индуктивности, или полуобмотки трансформатора источника питания $U_{пит}$ или низкоомные сопротивления. Для исключения влияния емкостей кабеля в схеме предусматривают специальные меры. Сигнал на выходе $U_{вых}$ такого моста практически линейно зависит от изменения емкости датчика.

Индуктивные датчики. Индуктивные датчики предназначены для измерения угловых и линейных перемещений, которые преобразуются в изменение индуктивности. Так как управляющим устройством такого датчика является реактивное сопротивление, то питание схемы осуществляется от источника переменного тока. Индук-

тивные датчики не имеют трущихся контактов, поэтому в сравнении с потенциометрическими они обладают большей надежностью и более высокой чувствительностью. Схема простейшего индуктивного датчика с подвижным якорем приведена на рис. 5.4.5. Этот датчик представляет собой катушку 1, размещенную на сердечнике 2 из ферромагнитного материала. Обмотка в простейшем случае включена в цепь переменного питания последовательно с сопротивлением нагрузки z_n . При перемещении якоря 3 в направлении x изменяются зазор δ и индуктивное сопротивление датчика. Индуктивность датчика, приведенного на рис. 5.4.5,

$$L = \omega^2 / z_M = \omega^2 / \sqrt{(R_M + 2R_\delta)^2 + x_M^2}, \quad (5.4.4)$$

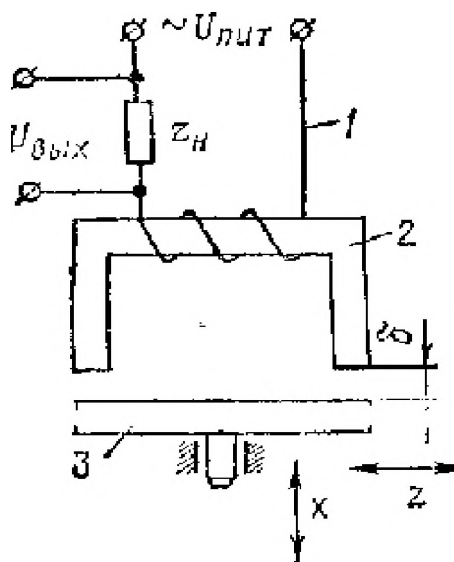


Рисунок 5.4.5.

где ω - число витков обмотки; z_M - полное магнитное сопротивление цепи, 1/Гн; R_M и x_M - активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления цепи, 1/Гн; R_δ - магнитное сопротивление воздушного зазора, 1/Гн, равное

$$R_\delta = \delta / (\mu_0 S_\delta),$$

где δ - величина воздушного зазора, м; S_δ - площадь зазора, м²; μ_0 - магнитная проницаемость воздуха, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Пренебрегая в (5.4.4) сопротивлением магнитопровода, которое мало в сравнении с сопротивлением R_δ , получают

$$L = \mu_0 \omega^2 S_\delta / (2\delta). \quad (5.4.5)$$

Из этой формулы следует, что зависимость индуктивности датчика от величины зазора нелинейная (рис. 5.4.6). Приближенно в диапазоне изменения зазора от 0,1 до 0,15 δ_0 (δ_0 - начальный зазор) характеристику можно считать линейной. Поэтому описанные датчики нашли применение для измерения малых перемещений - от единиц микрометров до единиц миллиметров. Если якорь датчика перемещается в направлении z (рис. 5.4.5), то его индуктивность изменяется в зависимости от изменения площади зазора. Это зависимость линейна. Датчик позволяет измерять перемещения в несколько сантиметров.

Для получения линейной характеристики в большом диапазоне

изменения зазора $L = f(\delta)$ используют реверсивные схемы (дифференциальные индуктивные датчики) (рис. 5.4.7). Когда якорь 1 находится в среднем положении, т. е. $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, то индуктивности обеих катушек 2 и 3 одинаковы и выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ равно нулю. При отклонении якоря в какую-либо сторону на выходе датчика появляется напряжения изменяется на 180° . Характеристика датчика $U_{\text{ВЫХ}} = f(x)$ представлена на рис. 5.4.8. Параметры датчика выбираются так, чтобы в допустимых пределах изменения x зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(x)$ была линейна.

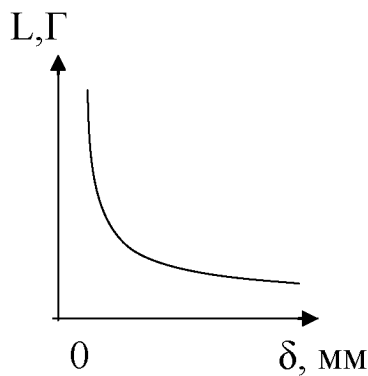


Рисунок 5.4.6 Характеристика индуктивного датчика.

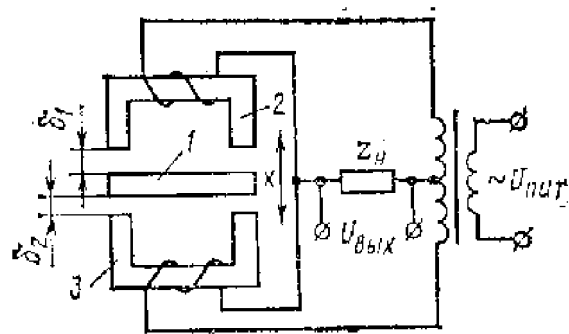


Рисунок 5.4.7 Схема дифференциального индуктивного датчика.

Чувствительность индуктивного датчика можно определить по характеристике $L = f(\delta)$ или $U_{\text{вых}} = f(x)$ (рис. 5.4.8) как тангенс угла между касательной к кривой и осью абсцисс. Чувствительность простейшего индуктивного датчика равна $\eta = dL / d\delta$ или $\eta = dU_{\text{вых}} / dx$.

На основании формулы (5.4.5)

$$\eta = \mu_0 \omega^2 S_\delta / (2\delta^2). \quad (5.4.6)$$

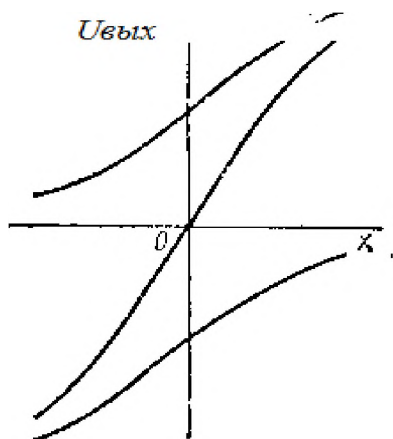


Рисунок 5.4.8 Характеристика дифференциального индуктивного датчика.

Чувствительность дифференциального датчика примерно в два раза выше по сравнению с рассмотренным выше простейшим датчиком (рис. 5.4.5). С точки зрения динамики индуктивные датчики рассматриваются как безынерционные звенья.

Индуктивные датчики с переменной площадью зазора более универсальны, чем с переменным зазором. Они находят широкое применение в авиации потому, что удовлетворительно работают при частотах, не превышающих 5000 Гц, так как на более высоких частотах возрастают потери на перемагничивание.

Для измерения угловых перемещений используется дифференциальный трансформаторный датчик с поворотным движением якоря.

5.5 Устройства преобразования информации

Функциональная схема цифровой САУ имеет вид (рис. 5.5.1), где ЭВМ – электронная вычислительная машина; ИМ - исполнительный механизм, ОУ – объект управления.

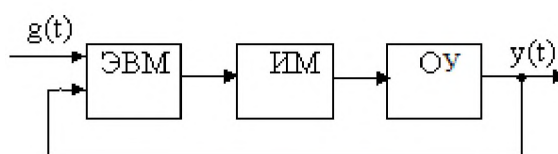
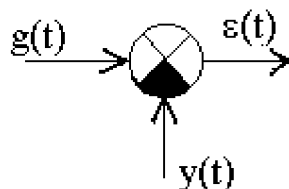


Рисунок 5.5.1

Рассмотрим преобразующие устройства для сопряжения цифровых и аналоговых элементов цифровой САУ, полагаем, что устройство сравнения входит в состав ЭВМ.



Представим ЭВМ следующим образом (рис. 5.5.2). Это цифровая система с аналоговым входом и аналоговым выходом. Здесь АЦП – аналого-цифровой преобразователь (шифратор), ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь (дешифратор); ЦП - центральный процессор. Шифратор - специальное устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал. Количественная связь между

входной аналоговой величиной $A(t_i)$ и соответствующей цифровой величиной $N(t_i)$, характеризующая алгоритм преобразования, имеет вид

$$N(t_i) = A(t_i)/\Delta A \pm \delta N(t_i), \quad (5.5.1)$$

где ΔA - шаг квантования (аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода); $\delta N(t_i)$ - погрешность преобразования на данном шаге.

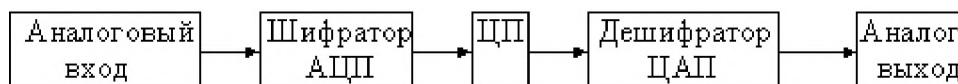


Рисунок 5.5.2

В цифровой системе имеется также дешифратор. Этот дешифратор специального типа - он преобразует цифровую информацию, поступающую от центрального процессора, в выходной аналоговый сигнал. Такой дешифратор называют цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Количественная связь между входной числовой величиной, $N(t_i)$ и ее аналоговым эквивалентом $A(t_i)$, характеризующая алгоритм преобразования, имеет вид

$$A(t_i) = N(t_i)\Delta A \pm \delta A(t_i) \quad (5.5.1)$$

где ΔA - шаг квантования по уровню (аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода); $\delta A(t_i)$ - погрешность преобразования.

Шифраторы и дешифраторы, преобразующие сигналы из аналоговой формы в цифровую и из цифровой формы в аналоговую, называются интерфейсными устройствами. Термин "интерфейс" обычно используется для обозначения комплекса средств, обеспечивающих переход от одного режима обработки данных к другому.

5.5.1 Цифро-аналоговые преобразователи

Рассмотрим ЦАП. Пусть необходимо преобразовать двоичные сигналы с выхода ЦП в выходное напряжение, изменяющееся в интервале 0-3 В. Пусть ЦАП имеет четыре входа: D, C, B, A, входные сигналы представляются в двоичной форме. Таблицу истинности для всех возможных комбинаций на входах дешифратора представлена в табл.5.5.1.

Таблица 5.5.1

№ строки	Цифровой вход				Аналоговый выход, В
	D	C	B	A	
0	0	0	0	0	0,0
1	0	0	0	1	0,2
2	0	0	1	0	0,4
3	0	0	1	1	0,6
4	0	1	0	0	0,8
5	0	1	0	1	1,0
6	0	1	1	0	1,2
7	0	1	1	1	1,4
8	1	0	0	0	1,6
9	1	0	0	1	1,8
10	1	0	1	0	2,0
11	1	0	1	1	2,2
12	1	1	0	0	2,4
13	1	1	0	1	2,6
14	1	1	1	0	2,8
15	1	1	1	1	3,0

Первый столбец таблицы – номера строк, начинающиеся с нулевой строки. Выходные напряжения, соответствующие входным сигналам, даны в последнем столбце таблицы. Нулевому состоянию (0000) входов ЦАП соответствует нулевой выходной сигнал (0 В). Если на входы подана двоичная комбинация 0001, то на выходе должен появиться сигнал 0,2 В. При входной комбинации 0010 на выходе получается аналоговый сигнал в 0,4В. При продвижении в табл. 5.5.1 вниз на каждую новую строку аналоговый выходной сигнал увеличивается на 0,2 В. Каждому состоянию цифровых входов соответствует определенное значение аналогового выхода.

Функциональная схема ЦАП представлена на рис. 5.5.3. Дешифратор состоит из двух блоков: резистивной схемы и суммирующего усилителя. Резистивная схема учитывает весовой коэффициент для цифровых сигналов на входах ЦАП. Дело в том, что на каждом из входов может быть одно из двух возможных значений сигнала: либо "0", либо "1". Вес "1" на входе В, в два раза больше веса "1" на входе

A, вес "1" на входе C в четыре раза больше веса "1" на входе A, а вес "1" на входе D уже в восемь раз больше веса "1" на входе A.

D	C	B	A
2^3	2^2	2^1	2^0

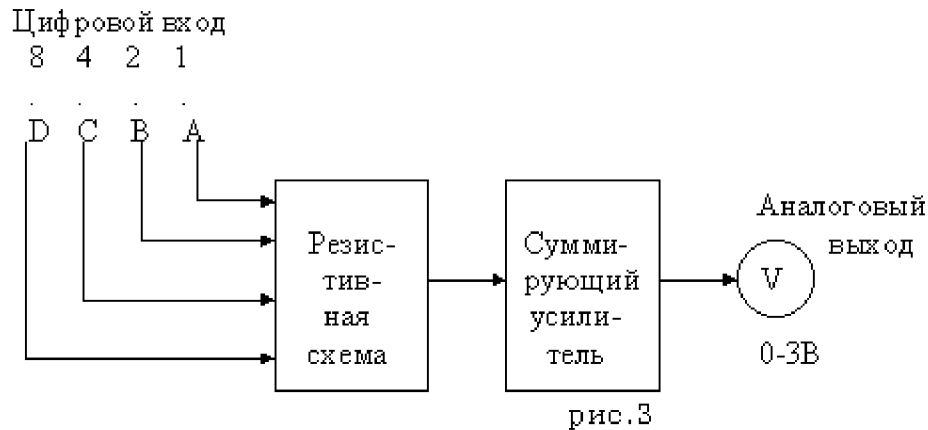


Рисунок 5.5.3.

В резистивной схеме могут использоваться различные способы соединения резисторов. Резистивные схемы иногда называются резистивными матрицами. Далее, суммирующий усилитель в схеме рис. 5.5.3 усиливает поступающие на его вход сигналы до уровня, соответствующего значениям входного напряжения в крайнем правом столбце табл.5.5.1. В качестве суммирующего усилителя обычно используют аналоговую интегральную схему, называемую операционным усилителем. Суммирующий усилитель называют также масштабирующим усилителем. Схема операционного усилителя дана на рис. 5.5.4.

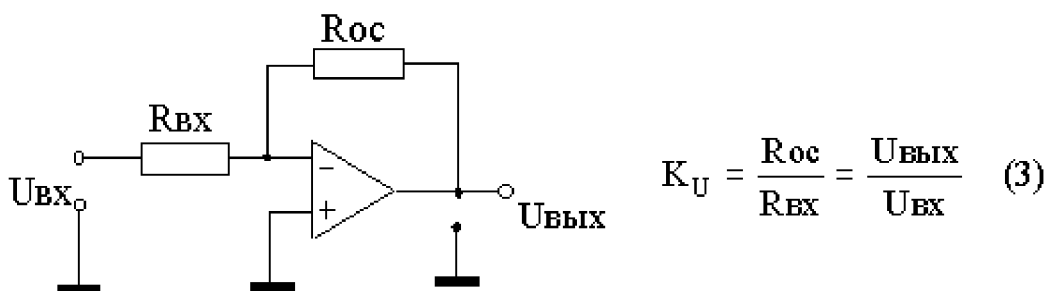


Рисунок 5.5.4.

Основная схема ЦАП. Электрическая схема простого ЦАП имеет вид (рис. 5.5.5). Входное напряжение $U_{вх} = 3 В$ приложено к пе-

реключателям D, C, B, A. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ измеряется вольтметром V. Резистивная схема собрана на резисторах R_1, R_2, R_3, R_4 . Пусть все переключатели замкнуты на общий провод 0, как показано на рис. 5.5.5. Тогда напряжение в точке E равно 0 В и выходное напряжение $U_{\text{вых}}=0$ В. Такая ситуация соответствует строке 0 в табл.5.5.1.

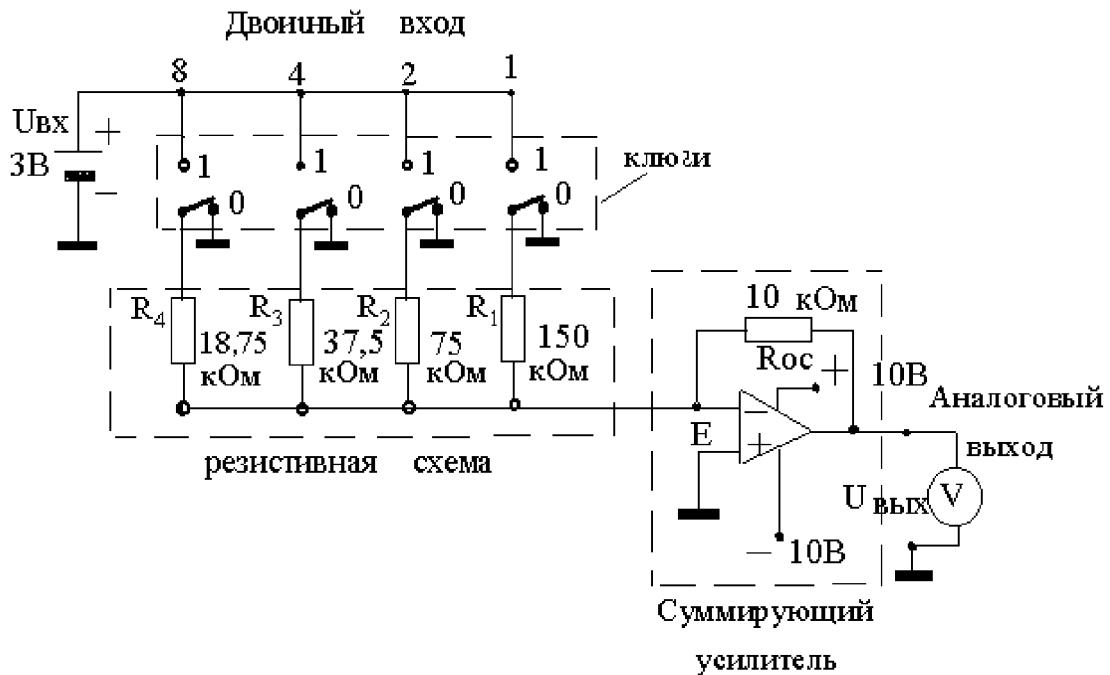


Рисунок 5.5.5. Принципиальная схема ЦАП.

Пусть теперь переключатель A установлен в положение логической "1", а переключатели B, C, D в положении логического "0". К операционному усилителю приложено напряжение $U_{\text{вх}} = 3$ В. При этом выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ равно $U_{\text{вых}} = k_y U_{\text{вх}}$,

$$\text{где } k_y = \frac{R_{oc}}{R_{ex}} = \frac{10}{150} = \frac{1}{15}.$$

Таким образом $U_{\text{вых}} = \frac{1}{15} \cdot 3 = \frac{1}{5} = 0,2$ В. Если на входы ЦАП подана двоичная комбинация 0001, то на выходе имеется $U_{\text{вых}} = 0,2$ В. Это соответствует строке 1 табл.5.5.1. Пусть теперь на входы ЦАП подается двоичная комбинация 0011. Для этого переключатели B и A устанавливаются в положение "1", а переключатели D и C в положение "0". В этом случае входное сопротивление операционного усилителя будет равно

$$R_{\text{ex}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{150 \cdot 75}{150 + 75} = 50 \text{ ом},$$

а $k_y = \frac{10}{50} = \frac{1}{5}$, следовательно $U_{\text{вых}} \frac{1}{5} \cdot 3 = -0.6B$, как и должно быть в соответствии со строкой 3 табл.5.5.1. При переходе к каждому следующему числу в двоичной счетной последовательности из табл.5.5.1 выходное напряжение увеличивается на 0.2 В. Это обеспечивается за счет возрастания коэффициента усиления k_y при подключении различных резисторов (R_1, R_2, R_3, R_4).

В качестве входного можно использовать любое напряжение, не превышающее напряжение питания усилителя ($\pm 10B$). Можно увеличить число двоичных разрядов, добавляя переключатели.

Схема ЦАП, показанная на рис. 5.5.5, имеет два недостатка:

1) в ней приходится использовать резисторы с широким диапазоном номиналов; 2) точность преобразования невысокая.

ЦАП лестничного типа. Электрическая принципиальная схема ЦАП лестничного типа дана на рис. 5.5.6. Резистивную схему иногда называют R-2R схемой лестничного типа. Здесь использованы резисторы только двух номиналов: 20 кОм и 10 кОм. Операционный усилитель такой же, как и в случае основной схемы ЦАП и данный ЦАП работает аналогично простейшему. Алгоритм работы ЦАП с резистивной схемой R-2R представлен в табл. 5.5.2. Значение аналогового напряжения на выходе каждой последующей строки отличается на 0,25 В от значения предыдущей строки. Каждый логический "0" в столбцах для D, C, B, A означает отсутствие напряжения (0 В) на соответствующем входе. Каждая "1" в этих столбцах означает, что к соответствующему входу приложено напряжение 3,75В.

Входы D, C, B, A ЦАП можно присоединить к выходам любой ТТЛ интегральной схемы (ИС), при этом ЦАП будет работать в соответствии с табл. 5.5.2. Напряжение $U_{\text{ex}} = 3,75 \text{ В}$ очень близко к выходному напряжению ИС семейства ТТЛ. Для них низкий логический уровень ("0") равно 0-0,8 В, а высокий логический уровень ("1") равно 2-5В. На рис. 5.5.2 представлен четырехразрядный ЦАП. На таком же принципе можно построить 8-, 16- и т. д. разрядные ЦАП. Добавляя число входов нужно оставить неизменной структуру соединений резисторов и их номиналов. Серийно выпускаются интегральные микросхемы 10- и 12-разрядных ЦАП.

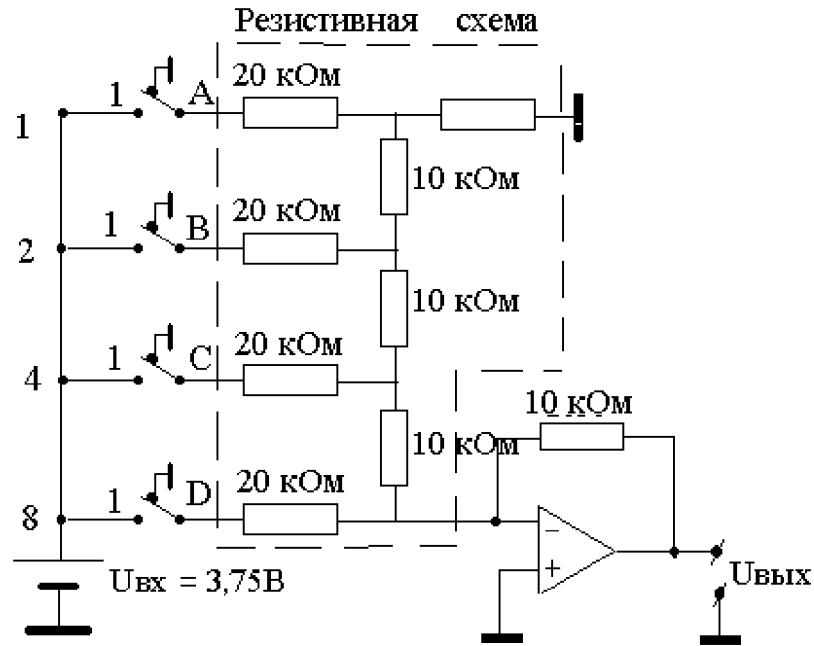


Рисунок 5.5.6 Схема лестничного типа (R-2R).

У рассмотренных ЦАП цифровая входная информация представлялась в виде положительных чисел, что не характерно для САУ, в которых измерительная и командная информация представлена числами с различными знаками. Для представления положительных и отрицательных цифровых величин можно использовать прямой код с учетом знака. В этом случае "1" в старшем разряде соответствует отрицательному числу, а "0" - положительному числу:

Двоичный код	Десятичное число
1 1 1 1 1 1 1 1	-127
1 0 0 0 0 0 0 1	-1
0 0 0 0 0 0 0 0	0
0 0 0 0 0 0 0 1	+1
0 1 1 1 1 1 1 1	+127

Для получения соответствующего биполярного выходного сигнала может быть применена следующая схема ЦАП (рис. 5.5.7):

Таблица 5.5.2.

Двоичный вход				Аналоговый выход, В
D	C	B	A	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0,25
0	0	1	0	0,5

0	0	1	1	0,75
0	1	0	0	1,00
0	1	0	1	1,25
0	1	1	0	1,50
0	1	1	1	1,75
1	0	0	0	2,00
1	0	0	1	2,25
1	0	1	0	2,50
1	0	1	1	2,75
1	1	0	0	3,00
1	1	0	1	3,25
1	1	1	0	3,50
1	1	1	1	3,75

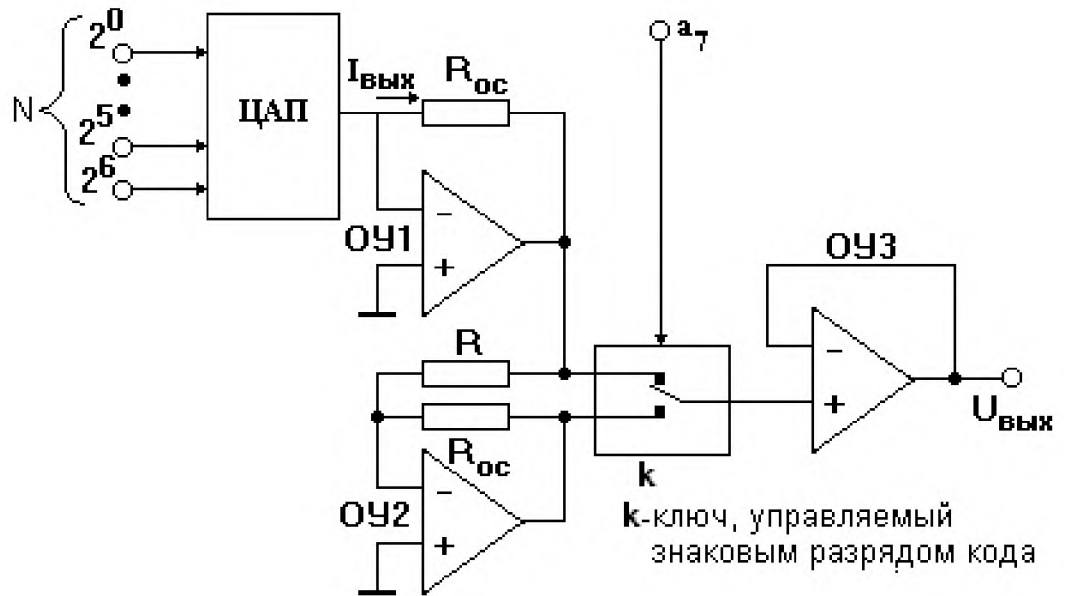


Рисунок 5.5.7.

5.5.2. Аналого-цифровой преобразователь

Базовая функциональная схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП) представлена на рис. 5.5.8. Данный АЦП преобразует аналоговый сигнал напряжения в 4-разрядный двоичный код. Полагая, что входное напряжение АЦП изменяется в пределах 0-3 В, составлена таблица 5.5.3, где определена количественная связь между входными и выходными сигналами.

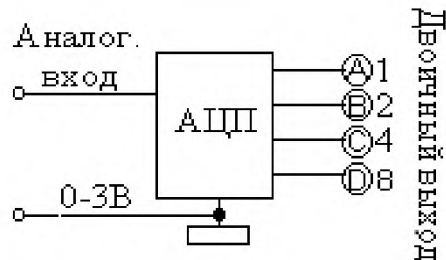


Рисунок 5.5.8.

Таблица 5.5.3

№ строки	Аналоговый вход, В	Цифровой выход			
		D	C	B	A
0	0,0	0	0	0	0
1	0,2	0	0	0	1
2	0,4	0	0	1	0
3	0,6	0	0	1	1
4	0,8	0	1	0	0
5	1,0	0	1	0	1
6	1,2	0	1	1	0
7	1,4	0	1	1	1
8	1,6	1	0	0	0
9	1,8	1	0	0	1
10	2,0	1	0	1	0
11	2,2	1	0	1	1
12	2,4	1	1	0	0
13	2,6	1	1	0	1
14	2,8	1	1	1	0
15	3,0	1	1	1	1

Табл. 5.5.3 получена из табл. 5.5.1 путем замены местами значений входного и выходного сигналов ЦАП. Увеличение входного

напряжения АЦП на 0,2 В приводит к увеличению двоичного числа на его выходе на единицу. Табл. 5.5.3 показывает закономерность работы АЦП.

Один из возможных вариантов построения АЦП дан на функциональной схеме (рис. 5.5.9). АЦП содержит компаратор напряжений, логический элемент «И», двоично-десятичный счетчик DDC и ЦАП. Компаратор (рис. 5.5.10) сравнивает аналоговое преобразуемое

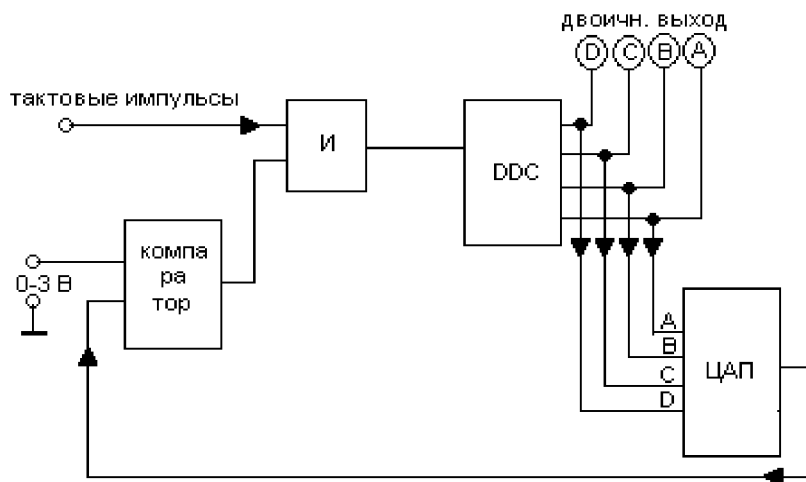


Рисунок 5.5.9.

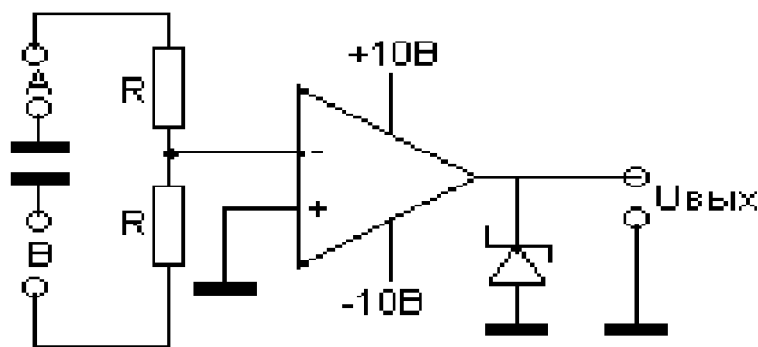


Рисунок 5.5.10.

напряжение на входе А с напряжением на входе В, поступающим с выхода АЦП, т.е. с ЦАП. Если $A > B$, то на выходе компаратора появляется логическая "1" и тактовые импульсы через схему «И» проходят на вход счетчика DDC. Счетчик посчитывает эти импульсы и увеличивает цифровой сигнал (двоичное число) на его выходе. Счет продолжается до тех пор, пока напряжение с выхода ЦАП сравняется или не превысит входное напряжение. В этой точке компаратор останав-

ливают счетчик.

Пусть входное напряжение равно 2 В. В соответствии с табл. 5.5.3 счетчик достигает до 1010, затем остановится, а по окончании цикла сбросится в нулевое состояние (0000), и счет начнется снова. Предположим, что к аналоговому входу А компаратора приложено напряжение в 0,55В, а счетчик находится в состоянии 0000. Тогда на выходе компаратора появится логическая "1", которая открывает схему «И» и счетчик начнет считать тактовые импульсы, пропуская 3 импульса. В этом случае на выходе счетчика, появится двоичная комбинация 0011. Эта комбинация поступает на входы ЦАП, у которого на выход появится напряжение в 0,6 В. Это напряжение поступает на вход В компаратора и т. к. $A < B$, то на его выходе появится логический "0". Логический элемент «И» закрывается. Счетчик остановится на двоичном числе 0011.

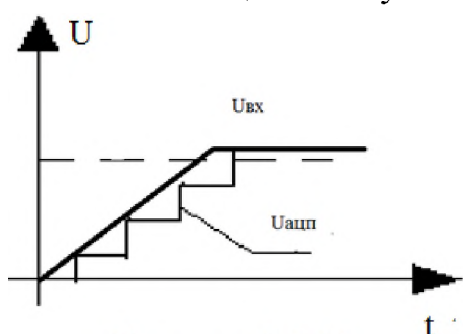


Рисунок 5.5.11.

Характер изменения напряжения на выходе АЦП дан на рис. 5.5.11.

Для преобразования аналогового сигнала в двоичный код требуется определенное время, которое зависит от частоты следования тактовых импульсов. Рассмотренный 4-разрядный АЦП относится к типу АЦП с **динамической компенсацией**. По такому же принципу можно построить 8 -, 16 - и т.д. разрядные АЦП.

АЦП интегрирующего типа. Функциональная схема такого АЦП изображена на рис. 5.5.12.

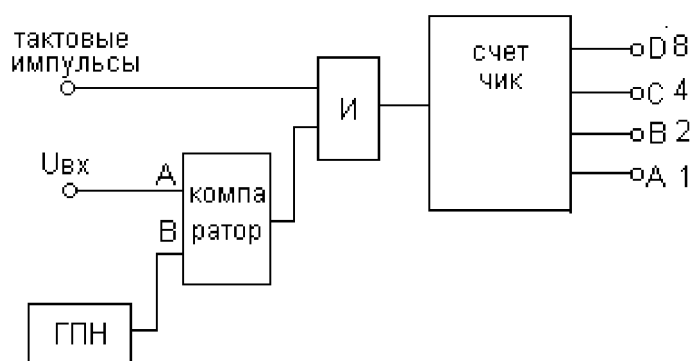


Рисунок 5.5.12.

В составе АЦП имеется генератор пилообразного напряжения (ГПН), компаратор, логическая схема "И" и счетчик. На входы компа-

ратора поступает аналоговый сигнал $U_{вх}$ и пилообразное напряжение с ГПН (рис. 5.5.13). На выходе компаратора логическая "1" остается до тех пор, пока напряжения на входах А и В не станут равными. За это время схема И пропускает, к примеру, три импульса и счетчик выдает код 0011.

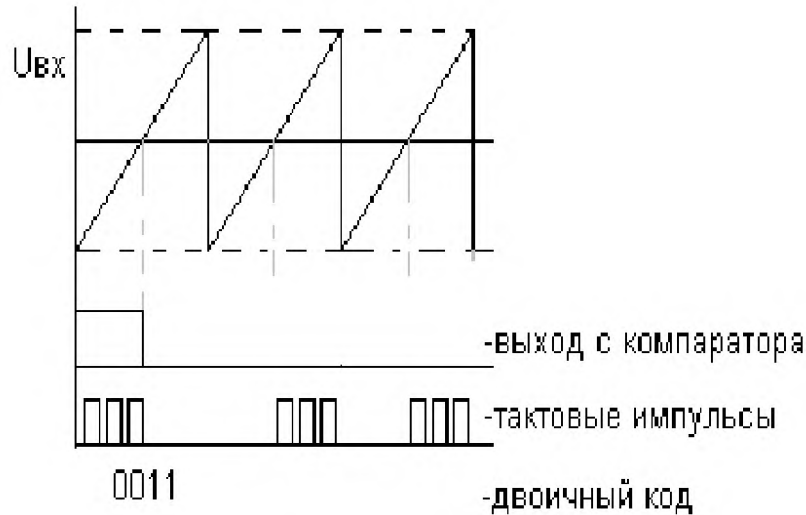


Рисунок 5.5.13.

АЦП последовательного приближения. В состав АЦП входят компаратор, регистр последовательного приближения и ЦАП (рис. 5.5.14). Эта схема осуществляет преобразование аналогового сигнала в код значительно быстрее по сравнению с другими схемами. Здесь регистр последовательного приближения "формирует запрос" относительно возможной величины аналогового входа.

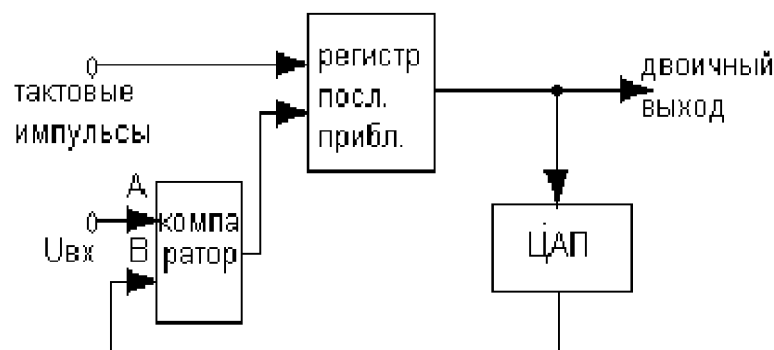


Рисунок 5.5.14.

На выход схемы засылается "1" в самый старший разряд двоичного числа. Если результат больше входной величины $U_{вх}$, то регистр последовательного приближения обнуляет "1" из старшего разряда и засылает "1" в регистр меньшего разряда. Если результат меньше входной величины, то добавляется "1" в младший разряд. Опрос продол-

жается по заранее разработанному алгоритму до тех пор, пока двоичный выход не будет соответствовать U_{ex} .

5.6. Устройства использования командной информации

Электронные усилители. Электронный усилитель позволяет преобразовать входные электрические сигналы в сигналы большей мощности. Это преобразование совершается за счет энергии источника питания. Электронные усилители широко применяются в автоматических устройствах, что обусловлено их высокой чувствительностью (порог чувствительности по току 10^{-12} - 10^{-13} А, по напряжению - 10^{-5} - 10^{-6} В) и малой инерционностью.

Основные характеристики электронных усилителей:

1) коэффициент усиления по напряжению

$$k = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} \approx \frac{dU_{вых}}{dU_{ex}} \quad (5.6.1)$$

2) коэффициент усиления по току

$$k_i = \frac{I_{вых}}{I_{ex}} \quad (5.6.2)$$

3) коэффициент усиления по мощности

$$k_p = \frac{P_{вых}}{P_{ex}} \quad (5.6.3)$$

4) чувствительность;

5) точность воспроизведения формы входного сигнала;

6) КПД усилителя, который определяется как отношение полезной мощности на выходе $P_{вых}$ к мощности, потребляемой от источника питания P_0 :

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_0} \quad (5.6.4)$$

Для усиления электрических сигналов первоначально использовались электронные лампы: триод или пентод.

Триод - это трехэлектродная лампа (рис. 5.5.1), состоящая из анода А, катода К, сетки С, стеклянной оболочки и выводов. В стеклянной оболочке создан высокий вакуум. При нагреве катода происходит эмиттирование электронов в вакуумный промежуток. При наличии разности потенциалов между анодом и катодом в вакуумном пространстве между ними создается электрическое поле. Если потен-

циал анода выше потенциала катода, то электроны, имеющиеся в вакуумном промежутке, движутся к аноду, создавая электрический ток через вакуумный промежуток. При этом количество электронов непрерывно восполняется за счет электронной эмиссии катода. При отрицательном относительно катода потенциале анода электрическое поле возвращает эмитированные катодом электроны снова на катод, и ток через вакуумный промежуток не протекает.

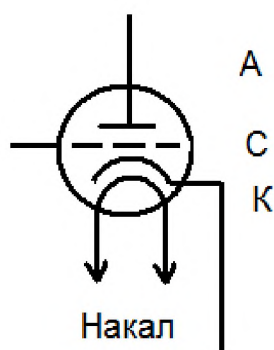


Рисунок 5.5.1

Третий электрод триода - сетка - предназначена для управления величиной тока в промежутке анод-катод. При отрицательном относительно катода потенциале сетка оказывает тормозящее действие на электроны, уменьшая анодный ток (ток между катодом и анодом), а при положительном потенциале - сетка как бы “помогает” аноду, увеличивая его ток. Таким образом, сетка позволяет регулировать величину анодного тока в широких пределах.

Рассмотрим схему электронного усилителя на триоде (рис. 5.6.2).

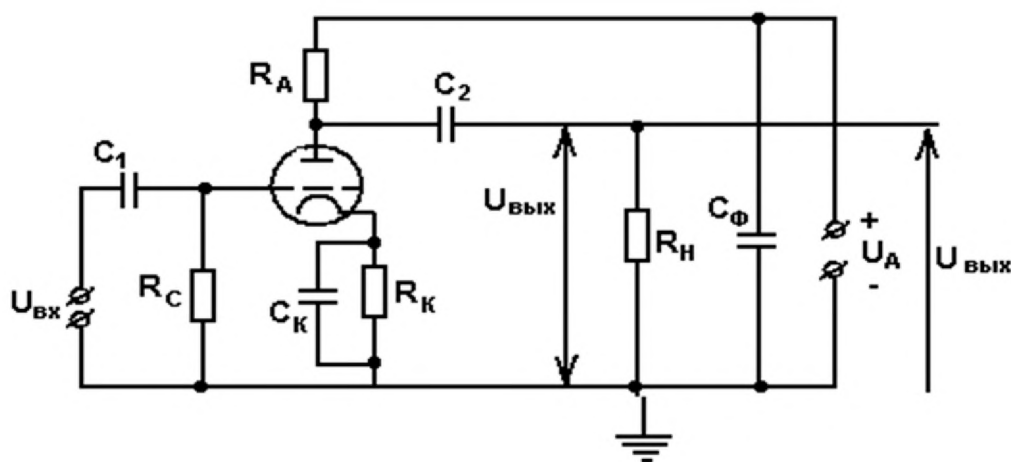


Рисунок 5.6.2 Схема с общим катодом.

Назначение элементов схемы следующее: R_A -резистор нагрузки в анодной цепи лампы. Цепь $R_K C_K$ называется цепью автоматического смещения и предназначена для подачи на катод лампы более положительного потенциала по отношению к сетке лампы. Этим обеспечивается работа электронного усилителя без сеточных токов.

Резистор R_C - резистор утечки сетки предназначена для стекания электронов, случайно попавших на сетку, к общей шине. При отсутствии R_C сетка заряжается перехваченными его электронами до какого-то неконтролируемого и изменяющегося при работе потенциала, что нарушает нормальную работу усилителя. Конденсатор C_Φ фильтрует переменную составляющую питающего напряжения. R_H - сопротивление нагрузки.

На вход усилителя подается переменное напряжение, которое через конденсатор C_1 управляет сеткой лампы. На выходе схемы получается пульсирующее напряжение, переменная составляющая которого пропорциональна входному сигналу. Усиление обеспечивается за счет того, что небольшие изменения потенциала сетки управляет изменением тока большей величины, текущего в анодной цепи лампы.

В настоящее используются полупроводниковые (транзисторные) усилители и усилители на интегральных схемах, значительно меньшие по габаритам и весу, чем усилители на электронных лампах.

Магнитные усилители. Существует несколько типов магнитных усилителей, в частности, дроссельные, трансформаторные, с обратной связью.

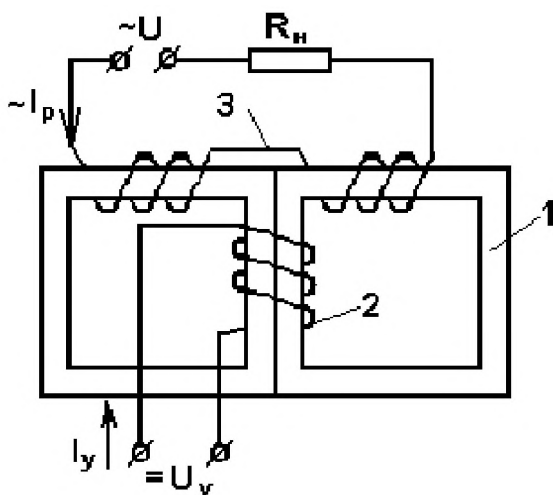


Рисунок 5.6.3. Дроссельный магнитный усилитель.

Рассмотрим простейший дроссельный магнитный усилитель (ДМУ) (рис.5.6.3.), состоящий из магнитопровода 1, обмотки управления 2, рабочей обмотки 3 и сопротивления нагрузки R_H .

Рабочая обмотка и нагрузка соединяются последовательно и питаются переменным напряжением. Управляющая обмотка ДМУ присоединена к постоянному напряжению. Нагрузочная характеристика

ДМУ показывает, что при отсутствии тока управления (подмагничивания) I_y через рабочую обмотку и нагрузку R_H протекает ток I_0 . Увеличение тока подмагничивания вызывает увеличение переменного тока I_p , причем характерным является то, что наклон линейной части характеристики близок к 45° (рис.5.6.4).

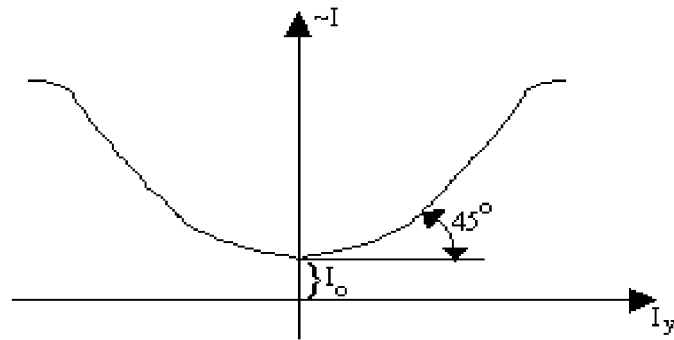


Рисунок 5.6.4.

Эффект усиления (при $U_p = const$) достигается перераспределением напряжения между рабочей обмоткой и нагрузкой:

1) при отсутствии тока I_y дроссель имеет большое индуктивное сопротивление, и напряжение U_p почти целиком уравнивается ЭДС рабочей обмотки;

2) при увеличении тока подмагничивания I_y индуктивное сопротивление дросселя уменьшается, т.е. ток I_p увеличивается:

$$I_p = \frac{U_p}{\sqrt{(R_H + r)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (5.6.5)$$

где r - активное сопротивление рабочих обмоток;

ω - круговая частота $= 2\pi f$;

ωL - индуктивное сопротивление рабочей обмотки.

Как следствие почти все напряжение U_p оказывается приложенным к нагрузке. Коэффициент усиления по мощности определяется следующим образом:

$$K_p = \frac{P_{вых} - P_0}{P_y}, \quad (5.6.6)$$

где P_0 - начальная мощность при $I_y = 0$; $P_{вых}$ - значение мощности на нагрузке при некотором значении $I_y \neq 0$; P_y - мощность управления

постоянным током в цепи подмагничивания.

Гидравлические и пневматические усилители. Гидравлические и пневматические усилители делятся на две группы: дроссельные и струйные. В дроссельных устройствах осуществляется изменение проходного сечения для рабочей среды и соответственно этому и изменение её расхода и давления. В струйных устройствах используется влияние смещения струи рабочей среды относительно приемного отверстия на поступающее в него количество жидкости или воздуха.

Из дроссельных усилителей наиболее распространены два типа. В устройствах первого типа дросселируется основной поток рабочей среды, поступающей в поршневые или мембранные исполнительные механизмы. Представителем этого типа устройств является гидравлический усилитель (серводвигатель) с золотниковым распределителем. В устройствах второго типа для воздействия на рабочий орган дросселируют вспомогательный поток рабочей среды - расход вспомогательного потока влияет на давление (расход) основного потока. К этому типу дроссельных усилителей относится пневматический серводвигатель типа сопло-заслонка.

В **золотниковом гидравлическом усилителе** (рис. 5.6.5) перемещением золотника меняют степень открытия его рабочих отверстий, и следовательно, давление и расход рабочей жидкости, проходящей через золотник в рабочий цилиндр исполнительного механизма.

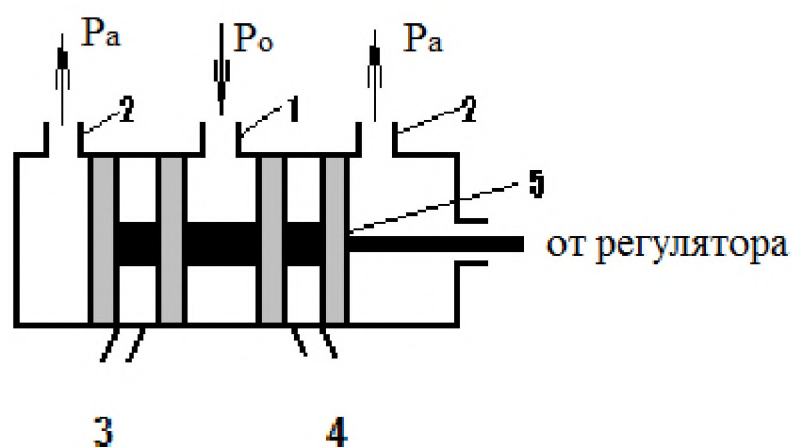


Рисунок 5.6.5 Золотниковый гидравлический усилитель: 1 - трубка подвода энергии (рабочей жидкости); 2 - трубки слива; 3,4- трубки для соединения исполнительного механизма; 5 - золотник со штоком.

Золотниковый гидравлический усилитель включает в себя золотнико-

вый механизм со штоком и систему трубок. В золотниковом усилителе небольшие сила и мощность, которые, действуя через шток, перемещают золотник, используются для управления давлением и расходом рабочей жидкости. Поступательное движение по золотнику сообщается регулирующим устройством (автоматическим регулятором). Поршневой исполнительный механизм соединяется через трубки 3 или 4 с трубкой подвода рабочей жидкости. Рабочая жидкость, действуя с давлением P_0 на исполнительный механизм, приводит его в движение. По трубе 1 подводится рабочая жидкость с давлением P_0 , а трубы 2 служат для слива, где имеет место атмосферное давление P_a . При поступательном движении золотника в ту или другую сторону одна из полостей рабочего цилиндра исполнительного механизма соединяется с жидкостью с давлением P_0 , а другая – со сливом. Происходит перемещение рабочего цилиндра. Условие равновесия рабочего цилиндра исполнительного механизма имеет вид:

$$P_1 S_n = P_2 S_n + P \quad (5.6.7)$$

где S_n – площадь сечения поршня; P_1, P_2 – давление в разных полостях рабочего цилиндра, разделенных поршнем; P – сопротивление перемещению поршня.

На вид функциональной зависимости «вход – выход» золотникового исполнительного механизма влияет форма рабочих отверстий. Выбором соответствующих форм рабочих отверстий можно получить различные функциональные зависимости, в том числе, и релейную.

Давление рабочей жидкости в золотниках составляет 2 – 6 бар, ход золотника 10 – 15 мм.

Усилители второго типа. В гидравлическом или пневматическом усилителе второго типа происходит управление основным потоком рабочей среды воздействием на вспомогательный поток рабочей среды (рис. 5.6.6). Основным элементом пневматических усилителей является устройство сопло-заслонка. Рабочее вещество под давлением P_0 через постоянный дроссель 1 поступает в камеру 2. Основным поток вещества с давлением P_1 по трубе 3 поступает в камеру исполнительного механизма 4. Вспомогательный поток вещества через дросселирующее сопло с переменным сечением 5 выводится из усилителя. Давление P_2 (количество Q_2) этого потока регулируется заслонкой 6, которая связана с системой автоматики. Таким образом, количество основного потока вещества Q_1 зависит от количества выводимого

вспомогательного потока вещества Q_2 . Выходное давление P_1 основного потока рабочей среды функционально связано с давлением P_2 вспомогательного потока среды, проходящий через переменный дроссель. С увеличением количества вещества вспомогательного потока Q_2 количество вещества основного потока уменьшается. Зависимость давления вещества основного потока P_1 от сечения дросселей имеет вид:

$$P_1 = P_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha_1 S_2}{\alpha_2 S_1}\right)^2}, \quad (5.6.8)$$

где α_1, α_2 - коэффициент расхода дросселей постоянного и переменного сечения; S_1, S_2 - соответственно площади сечений.

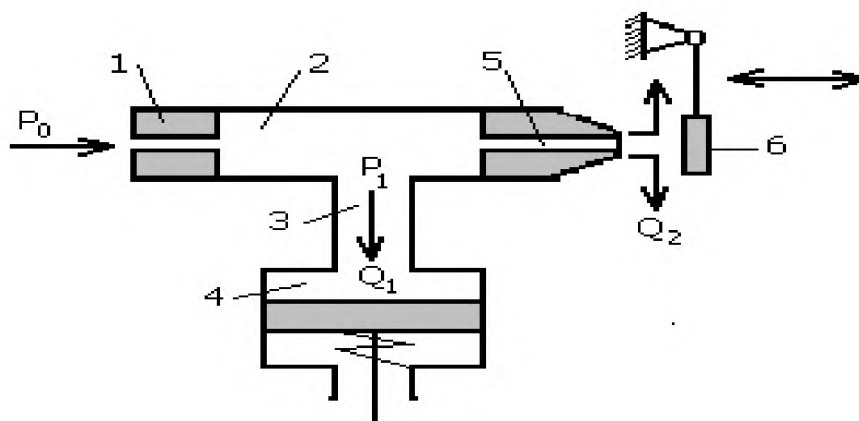


Рисунок 5.6.6 Усилитель типа сопло-заслонка.

Струйный гидравлический усилитель (рис.5.6.7) состоит из струйной трубки 1, плиты 2 с приемными соплами 3. Рабочая жидкость подается по трубе 4 и через шарнирное соединение проходит в струйную трубку. Струйная трубка 1 может поворачиваться и в равновесии поддерживается силой пружины 5 и мембраной измерительного устройства 6. Приемные сопла соединены с рабочей полостью поршневого исполнительного механизма 7. Струя масла вытекает из струйной трубки со скоростью 25-30 м/сек. Если струйная трубка не находится точно посередине между приемными соплами, то давление в одном из сопел увеличивается, и поршень исполнительного устройства приходит в действие. Расстояние между отверстиями сопел около 0,2 мм, расстояние между трубкой и сопловой плиткой 8мм.

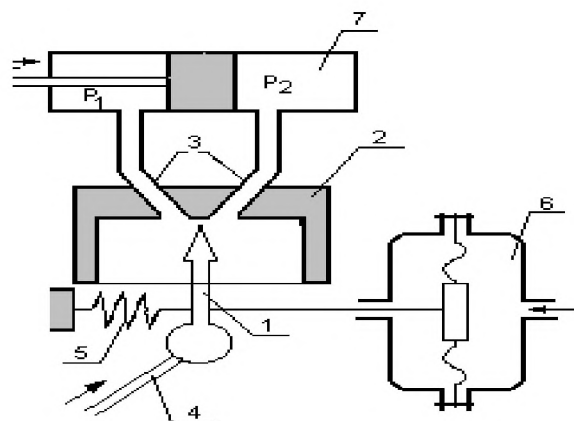


Рисунок 5.6.7 Струйный гидравлический усилитель.

Исполнительные устройства САУ. Исполнительные устройства (механизмы) предназначены для непосредственного воздействия на рабочий орган. По виду применяемой энергии исполнительные механизмы бывают электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные (электрогидравлические и электропневматические).

Наиболее надежными являются гидравлические устройства. Конструктивно гидравлические и пневматические устройства выполняются в виде мембранных, поршневых, сифонных и лопастных. Эти устройства позволяют получать наибольшее усиление для перемещения органа регулирования.

К электрическим исполнительным устройствам относятся электромагнитные и электромашинные устройства.

Исполнительные механизмы могут выполнять простейшие операции типа «открыть», «закрыть», в этом случае их называют двухпозиционным. Исполнительные механизмы могут осуществлять более сложное ступенчатое или плавное регулирование. Исполнительные устройства автоматических регуляторов значительную часть времени работают в переходных режимах, поэтому к ним предъявляются требования малой инерционности и повышенной чувствительности.

Электромагнитные исполнительные устройства. К устройствам этого типа можно отнести реле, соленоиды и электромагнитные муфты. Реле - элемент, в котором изменение входной электрической величины преобразуется в механическое перемещение, замыкающее или размыкающее контакты. Электромагнитные реле, которые применяются для переключения мощных цепей тока, называют контакторами. Соленоид представляет собой катушку, внутри которой распо-

ложен якорь. При подаче напряжения на катушку якорь приходит в движение и перемещает рабочий орган.

В системах автоматики применяются электромагнитные муфты следующих типов: фрикционные, порошковые и муфты скольжения.

Фрикционная муфта состоит из двух полумуфт, насаженных на ведущий и ведомый валы. Когда на обмотку ведущей полумуфты подается напряжение, то полумуфты притягиваются и благодаря трению между ними ведомая полумуфта приводится во вращение, перемещая орган регулирования. В муфтах скольжения момент вращения на ведомый вал передается за счет магнитного поля, создаваемого обмоткой, расположенной на ведущей полумуфте, при вращении которой в ведомой полумуфте индуцируется ток; при взаимодействии двух магнитных полей возникает момент вращения, приводящий в движение ведомый вал.

В системах автоматизации тепловлажной обработки изделий широко распространены электромагнитные вентили типа СВВ и СВМП, в которых исполнительным механизмом служит электромагнит. На рис.5.6.8 приведена схема простейшего электромагнитного вентиля, который состоит из электромагнита с якорем, пружины и золотников.

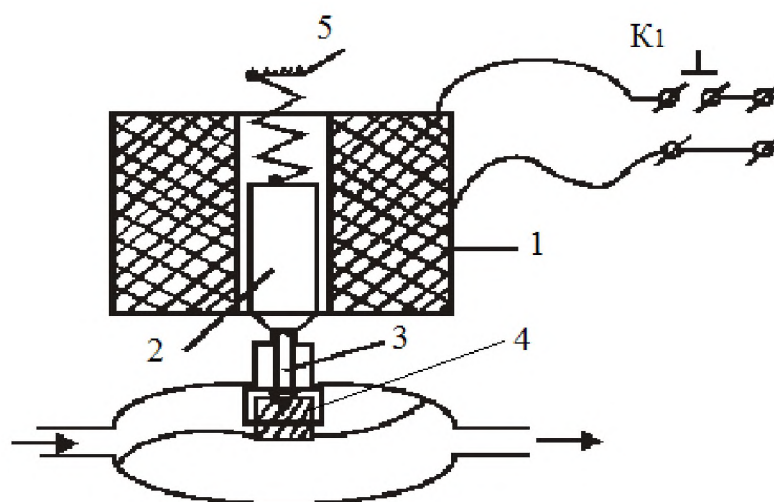


Рисунок 5.6.8 Электромагнитный вентиль: 1 – электромагнит; 2 – якорь; 3- разгрузочный золотник; 4 – золотник; 5 – пружина.

Когда на электромагнит напряжение не подается, то под действием пружины якорь электромагнита занимает нижнее положение и основное отверстие вентиля закрыто золотником. Небольшое отверстие в золотнике закрыто разгрузочным золотником. Необходимое уплотнение в этом узле достигается за счет перепада давления. При замыка-

нии контактов, питающих электромагнит, последний срабатывает и, преодолевая усилие пружины, втягивает якорь в себя. Вентиль открывается полностью. Таким образом, вентиль потребляет энергию только в том случае, если он открыт. Электромагнитные вентили предназначены для работы совместно с системами дистанционного и автоматического регулирования паро-воздушной и водной среды при температурах до 150°C и давлении до 16 кгс/см^2 .

Электромашинные исполнительные устройства. К электромашинным исполнительным устройствам относятся устройства с электрическими двигателями различных типов. Двигатели постоянного тока обычно используются в системах совместно с электромашинными усилителями. Для управления такими двигателями применяют тиристорные преобразователи. Двигатели переменного тока применяются в системах автоматического управления различных классов благодаря их простоте, надежности, малой инерционности и удобства управления. Для включения электродвигателей используются контакторы и магнитные пускатели. В системах автоматического управления часто используются исполнительные устройства типов МЭО, МЭОБ, МЭОК, МЭМ, РИМЗ, ИМТМ, ИМ, ПР-М, ДР.

Электрические исполнительные механизмы ИМ-2/120 используются для перемещения регулирующих органов в системах автоматического регулирования, а также в схемах ручного дистанционного управления. Исполнительный механизм ИМ-2/120 состоит из следующих основных частей: конденсаторного реверсивного электропривода, шестеренчатого редуктора, конечных выключателей, реостата обратной связи и кривошипа для соединения с регулирующим органом. Общий конец обмоток проводом 2 подключается к сети (рис. 5.6.9). Реверс электродвигателя КД осуществляется переключением конденсатора С последовательно с одной из обмоток с помощью кнопок B_1 и B_2 . При подключении к сети через конечный выключатель KB_1 двигатель будет вращаться по часовой стрелке, а при подключении к сети через выключатель KB_2 направление вращения изменится.

Рабочий угол поворота может быть установлен любым в пределах 120° . Номинальный момент на выходном валу 2 кгм . Время полного хода кривошипа на 120° - 40 сек.

Исполнительные механизмы с конденсаторными двигателями выполняются с моментами на выходном валу до 45 кгм . Двухпозиционный исполнительный механизм ДР (рис.5.6.10) состоит из однофазного асинхронного электродвигателя и редуктора, находящихся в од-

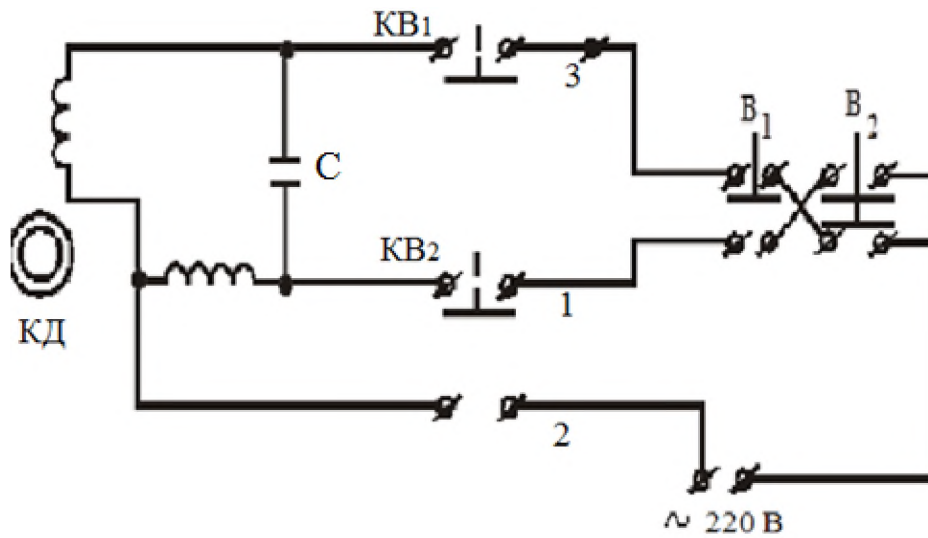


Рисунок 5.6.9 Электрическая схема ИМ-2/120.

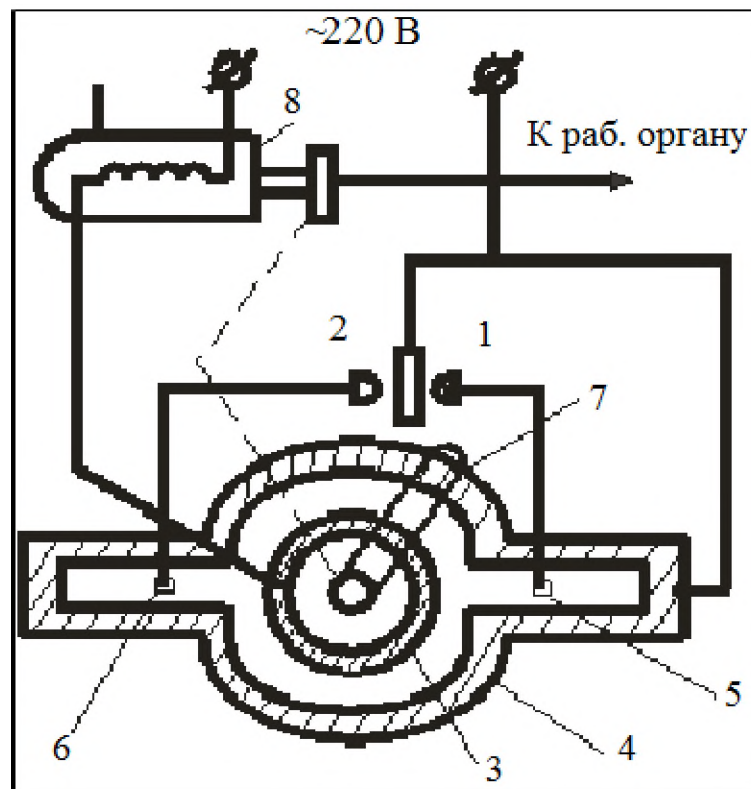


Рисунок 5.6.10 Исполнительный механизм ДР: 1,2 – контакты; 3 – внутреннее контактное кольцо; 4 – наружное контактное кольцо; 5,6 – конечные выключатели, 7 – движок; 8 – однофазный асинхронный электродвигатель с редуктором.

ном корпусе, конечных выключателей, контактов, контактных колец и движка. Когда значение регулируемой величины находится в заданных пределах, контакты 1 и 2 управляющего прибора разомкнуты (например, реле температуры). Двигатель и движок вращаются, пока движок замыкает кольцо 3 с внешним контактным кольцом 4. Достигнув конечного выключателя 5, движок размыкает цепь питания двигателя и останавливает двигатель. Изменение регулируемого параметра приведет к замыканию контакта 1. Двигатель включается, движок поворачивается по часовой стрелке и входит в контакт с нижней половиной контактного кольца 3 и 4. Регулирующий орган перемещается, пока движок не дойдёт до конечного выключателя 6. Теперь двигатель снова включится только при замыкании контакта 2, то есть когда регулируемый параметр выйдет за заданные пределы (теперь уже в другую сторону). При этом рабочий орган придет к другому крайнему положению. Исполнительные механизмы типа ДР осуществляют как поворот регулирующего органа, так и его поступательное движение.

Гидравлические и пневматические исполнительные механизмы удобны и надежны в эксплуатации, компактны и просты по конструкции и поэтому широко применяются в автоматических устройствах. Среди гидравлических и пневматических исполнительных механизмов наибольшее распространение получили мембранные и поршневые устройства.

Пневматические исполнительные механизмы. Как отмечалось выше, существуют следующие виды исполнительных механизмов: мембранные, поршневые, сильфонные и лопастные. Пневматические исполнительные механизмы характеризуются высокой надежностью, дешевизной и простотой конструкции. Многие из них обладают значительной мощностью, т.е. способны при значительном ходе развивать большие перестановочные усилия.

Пример поршневого исполнительного механизма в составе усилителя типа сопло-заслонка показан на рис.5.6.6, а в составе струйного усилителя – на рис.5.6.7.

Наибольшее распространение получили мембранные исполнительные механизмы (МИМ). Пневматические МИМ предназначены для пропорционального преобразования входного пневматического сигнала в механическое перемещение выходного звена (штока, рычага). Величина перемещения штока составляет 100 ÷ 160мм и рассчитана на работу с золотниковыми регулирующими клапанами. МИМ вы-

пускаются конструктивно объединенными с регулируемыми клапанами в единое изделие (рис. 5.6.11). МИМ состоит из мембраны 1 с жестким центром 2, пружины 3, зажатой мембраной и корпусом 4, штока 5, сальников 6 и золотника клапана 7.

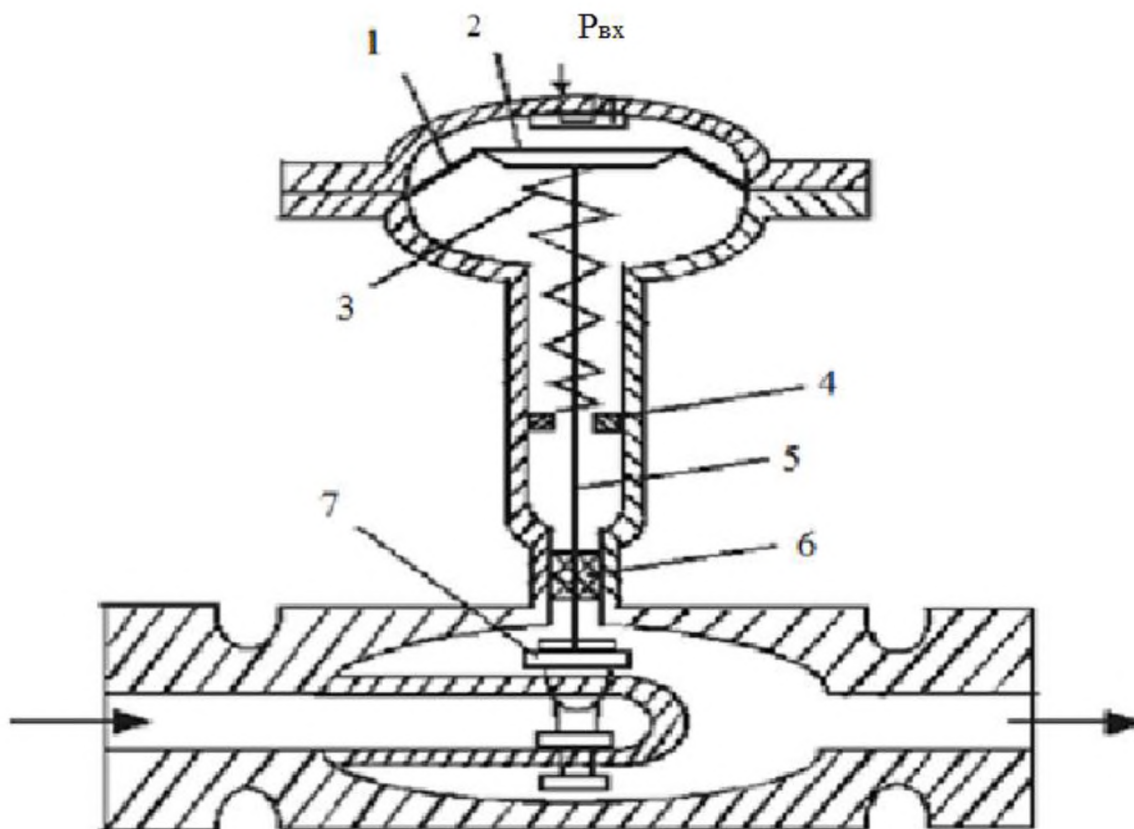


Рисунок 5.6.11.

Рабочее вещество с давлением $P_{вх}$ поступает во входную камеру и действует на мембрану. Мембрана прогибается, в зависимости от величины давления сжимая или отпуская пружину, и перемещает шток, соединенный с золотником клапана. При этом уменьшается или увеличивается степень открытия клапана, тем самым уменьшая или увеличивая количество вещества или энергии, поступающего на объект управления.

Мембранные приводы не являются самотормозящимися, т.е. исчезновение командного сигнала приводит к тому, что рабочий орган, управляемый МИМ, занимает одно из крайних положений: "открыто" или "закрыто". В связи с этим при проектировании системы автоматизации с использованием МИМ необходимо выбрать такой тип рабочего органа, при котором исчезновение командного сигнала не приведет к опасным нарушениям в работе объекта автоматизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы автоматизации управления производством: Учебное пособие для студ. техн. вузов / И. М. Макаров, Н. Н. Евтихеев, Н. Д. Дмитриев и др.; Под ред. И. М. Макарова. - М.: Высшая школа, 1983. - 504 с.
2. Справочник проектировщика АСУ ТП / Г. Л. Смилянский, Л. З. Амлинский, В. Я. Баранов и др.; Под ред. Г. Л. Смилянского. - М.: Машиностроение, 1987. - 527 с.
3. Емельянов А. И., Капник О. В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие по содержанию и оформлению проектов. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 400 с.
4. Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию АСУ ТП / Госкомитет СССР по науке и технике. - М.: Финансы и статистика, 1992. - 128 с.
5. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие / А. С. Ключев, Б. В. Глазов, А. Х. Дубровский, А. А. Ключев; Под. ред. А. С. Ключева. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 464 с.
6. Тищенко Н. М. Введение в проектирование систем управления. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 247 с.
7. АСУ ТП. Идентификация и оптимальное управление: Справочник / Под ред. В. Н. Салыги. - Харьков: Вища школа, 1976. - 180 с.
8. Энциклопедия технической кибернетики. - Киев: Главн. ред. Украинской советской энциклопедии, 1974. - Т.1 - 608 с., Т.2 - 624 с.
9. Кафаров В. В., Горбатов В. А., Павлов П. Г. Логическое управление технологическими процессами. - М.: Энергия, 1978. - 272 с.
10. Основы управления технологическими процессами / Под ред. Н. С. Райбмана. - М.: Наука, 1978. - 440 с.
11. Раппопорт Г. Н., Солин Ю. В., Гривцов С. П. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. - М.: Машиностроение, 1977. - 246 с.
12. Стефани. Основы построения АСУ ТП. - М.: Энергоиздат, 1982. - 352 с.
13. Хазацкий В. Е. Управляющие машины и системы: Книга для заказчика АСУ. - М.: Энергия, 1976. - 248 с.
14. Вальков В. М., Вершинин В. Е. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. - Л.: Машинострое-

ние, 1977. – 240 с.

15. Мясников В. А., Вальков В. М., Омельченко И. С. Автоматизированные и автоматические системы управления технологическими процессами. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

16. Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления с микро ЭВМ. - М.: Наука, 1987. - 320 с.

17. Гостев В. И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – Киев: Техника, 1990. -280 с.

18. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

19. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. - М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

20. Острем К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. – М.: Мир, 1987. – 480 с.

21. Мини- и микроЭВМ в управлении промышленными объектами / Под общ. ред. И. Р. Фрейдзона, Л. Г. Филиппова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 236 с.

22. Никитюк Н. М. Микропроцессоры и микроЭВМ: Применение в приборостроении и научных исследованиях. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 168 с.

23. Ступин Ю. В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 288 с.

24. Гольденберг Л. М., Малер В. А., Малько Г. Б. Цифровые устройства и микропроцессорные системы. – М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.

25. Коффрой Дж. Технические средства микропроцессорных систем: Практический курс. – М.: Мир, 1983. – 344 с.

26. Потемкин И. С. Функциональные узлы цифровой автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

27. Воробьев И. В., Вернер В. Д. Элементная база и схемотехника средств сопряжения / Микропроцессоры: Учебное пособие. – М.: , Книга 3. 1984. – 197 с.

28. Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов. – М.; Радио и связь, 1990. – 256 с.

29. Акматбеков Р. А. Программируемые логические контроллеры в цифровых системах автоматики // Проблемы управления и информатики: Докл. междунард. научн. конф. (19-22 сентября 2000 г.). – Б.: СКРП "Бим Принт", 2000.- с. 183-188.

30. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
31. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. - М.: Энергия, 1973. - 440 с.
32. Автоматизация настройки систем управления / Под. ред. В. Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
33. Промышленные автоматические регуляторы / Ш. Е. Штейнберг и др. – М.: Энергия, 1973. – 568 с.
34. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы: Справочное пособие / Под ред. Б. Д. Кошарского. – Л.: Машиностроение, 1976. – 485 с.
35. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочное пособие / Под ред. В. В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
36. Справочник по средствам автоматики / Под ред. В. Э. НIZE и И. В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
37. Петров И. К., Солошенко М. М., Царьков В. А. Приборы и средства автоматизации для пищевой промышленности. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 416 с.
38. Приборы и средства автоматизации: Отраслевой каталог. – М.: ЦНИИТЭприборостроения, 1989, многотомное издание с подразделами.
39. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования / Под ред. Е. А. Санковского. – Минск: Высшая школа, 1973. – 583 с.
40. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
41. Андреев Н. И. Теория статистически оптимальных систем управления. – М.: Наука, 1980. – 415 с.
42. Радионов В. Д., Терехов В. А., Яковлев В. Б. Технические средства АСУ ТП. – М.: Высшая школа, 1989. - 263 с.
43. Рязанов Ю. А. Проектирование систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
44. Глинков Г. М., Маковский В. Л., Лотман С. Л. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1970. – 412 с.
45. Пятибратов А. П. и др. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: Учебник. – М.: Финансы и статистика, 2003.– 512 с.

46. Бери Нанс. Компьютерные сети. – М.: Восточная книжная компания, 1996. – 400 с.
47. Бойченко Е. В. и др. Локальные вычислительные сети. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
48. Вычислительные сети и сетевые протоколы / Под ред. Д. Девис. – М.: Мир, 1982. – 562 с.
49. Гук М. Аппаратные средства локальных сетей: Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2000. – 576 с.
50. Гук М. Аппаратные средства IBM PC: Энциклопедия. – СПб.: Питер, 1999. – 816 с.
51. Защита программного обеспечения / Под ред. Д. Гроувера. – 1992. – 283 с.
52. Кульгин М. Технология корпоративных сетей: Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2000 с. – 704 с.
53. Мартин Дж. Программирование для вычислительных систем реального времени / Под ред. Д. Ю. Панова. – М.: Наука, 1975.– 359 с.
54. Нориков Ю. В., Кондратенко С. В. Локальные сети: Архитектура, алгоритмы, проектирование. – М.: ЭКО, 2000. – 312 с.
55. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети: Принципы, технологии, протоколы: Учебник. – СПб.: Питер, 1998. – 672 с.
56. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Сетевые операционные системы. – СПб.: Питер, 2001. –
57. Якубайтис Э. А. Открытые информационные сети. – М.: Радио и связь, 1991. – 208 с.
58. Ильин В.А. Телеуправление и телеизмерение. - М.: Мир, 1982 г. – 312 с.
59. Коробова И. Л., Заташвили Ю. Р. Комплекс автоматизированного проектирования MATLAB-CTRL: Учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 1993. – 63 с.
60. Крутько П. Д., Максимов А. И., Скворцов Л. М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 306 с.
61. Андреев В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения. – М.: Высш. шк., 1985. – 391 с.
62. Беркович М. А. и др. Основы автоматики энергосистем – М.: Энергоиздат, 1981.
63. Кривенков В. В. Новелла В. Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. - М.: Энергоиздат, 1981.
64. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических си-

стем. Релейная защита сетей. - М.: Энергоиздат, 1984.

65. Акматбеков Р. А. Автоматика и автоматизация производственных процессов / Методическое руководство к выполнению раздела дипломного проекта для специальностей технологического факультета. – Фрунзе: типография ФПИ, 1984.- 22 с.

66. Акматбеков Р. А., Михеева Н. И., Сарлыкбек уулу М. Система автоматизированного контроля на базе персонального компьютера // Вестник Технологического университета «Дастан». - Бишкек, типография Кыргызской аграрной академии, 1999г., №2 - с. 117-123.

67. Акматбеков Р. А., Петрунин А. А. Система управления дорожным движением // Вестник Кыргызского Технического Университета им. И. Раззакова. - Бишкек: ИЦ «Техник», 1999г., №1(6).- с. 3-10.

68. Modicon 984 Catalog and Specifier's Guide. - USA, Modicon, Inc. 2005. - p. 408.

69. Automatisierungs systeme Übersichtskatalog. - Austria, Eggelsberg, Bernecker & Rainer Industrie- Elektronik GmbH, 2002. - 384 S.

70. PROVIT 5000. User's Manual. - Austria, Eggelsberg, Bernecker & Rainer Industrie-Elektronik GmbH, 2002. - p. 168.

71. Акматбеков Р. А. Руководство для программирования управляющих станций SIMATIC S7-300/400 / Учебное пособие для вузов. - КГТУ им. И. Раззакова; Бишкек: ИЦ Текник, 2010. – 112 с.

72. Отчет о НИР «Исследование и разработка компьютерных систем автоматизации на основе информационных и телекоммуникационных технологий» / Руководитель Р. А. Акматбеков, № госрегистрации 0006138. - Бишкек, 2011. – 132 с.

73. Акматбеков Р. А. Нижний уровень системы автоматизации трансформаторных подстанций. Доклады II межд. конференции (19-22 июня 2007г.) Ин-т Автоматики и информационных технологий НАН КР – Б.: ОсОО «Гульчинар», 2007.- с. 195-197.

74. Акматбеков Р. А. Концепция распределенной системы автоматизации очистной установки на базе информационных технологий. Телекоммуникационные и информационные технологии. Состояние и перспективы развития. КГТУ им. И. Раззакова – Б.: ОАО «Кыргызтелеком» 2008.- с.189-195

75. Отчет о НИР «Исследование и разработка автоматизированных очистных сооружений для улучшения экологии побережья озера Иссык-Куль» / Руководитель Р. А. Акматбеков, № госрегистрации 0005974. - Бишкек, 2011. – 124 с.

76. Токхейм Р. Основы цифровой электроники.-М.:Мир,1988,-392 с.