

Автоматизированные системы управления технологическими процессами: полевой уровень, программируемые контроллеры, операторские и сетевые решения, диагностика и цифровое расширение.

Учебное пособие

АННОТАЦИЯ

Учебное пособие раскрывает содержание автоматизированных систем управления технологическими процессами на полевом, локальном и операторском уровнях, включая программируемые логические контроллеры, средства измерения и исполнительные механизмы, человеко-машинный интерфейс, диспетчерские системы, промышленные сети, архивирование технологических данных, диагностику, надёжность, кибербезопасность, а также современные подходы edge-обработки и промышленного интернета вещей.

Материал построен по принципу инженерного жизненного цикла: от физического объекта управления - через измерение и алгоритм - к реализации, проверке и эксплуатации системы. Пособие не рассматривает уровень корпоративных информационных систем, документооборота, финансового и управленческого учёта, сосредотачиваясь исключительно на технологическом контуре предприятия.

Издание предназначено для учащихся и педагогических работников учреждений профессионально-технического и среднего специального образования по специальностям, связанным с автоматизацией производства, электротехникой и промышленной электроникой, а также может быть полезно инженерам, приступающим к самостоятельному освоению современной промышленной автоматизации.

Повный А. В., Гомельский государственный политехнический колледж

Сайт: <https://electricalschool.info/>

Канал в ТГ: <https://t.me/electricalschool>

Электронные учебные пособия: <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>

Пособия по АСУ ТП и программированию ПЛК:
<https://electricalschool.info/e-textbooks.html#!digiseller/articles/156405>

РАЗДЕЛ I. ИНЖЕНЕРНАЯ ОСНОВА АСУ ТП

Глава 1. АСУ ТП как система управления технологическим объектом

1.1. Понятие и сущность автоматизированной системы управления технологическим процессом

1.1.1. Определение и ключевые признаки

Автоматизированная система управления технологическим процессом представляет собой организованную совокупность технических средств, программного обеспечения и обслуживающего персонала, обеспечивающую измерение параметров технологического процесса, формирование управляющих воздействий на объект и предоставление человеку-оператору достоверной информации, необходимой для принятия решений.

Из данного определения вытекают три ключевых признака, отличающих АСУ ТП от других видов систем управления.

Первый признак - наличие технологического объекта, то есть реального физического процесса, подлежащего управлению. Без такого объекта понятие АСУ ТП теряет смысл: система создаётся не абстрактно, а под конкретную технологическую задачу - поддержание температуры в реакторе, регулирование уровня жидкости в резервуаре, управление скоростью конвейерной линии, дозирование компонентов смеси.

Второй признак - сочетание автоматических и автоматизированных функций. Часть операций система выполняет полностью самостоятельно, без участия человека, - например, экстренное отключение насоса при превышении давления. Другая часть операций выполняется с участием оператора, который при-

нимает решение на основе представленной ему информации - например, разрешение на запуск технологической линии после устранения неисправности. Именно это сочетание отражено в самом термине: система названа автоматизированной, а не автоматической.

Третий признак - многоуровневая структура, объединяющая полевые технические средства, локальные контроллеры, операторские интерфейсы и диспетчерские системы наблюдения. Многоуровневость АСУ ТП принципиально отличает её от простого автоматического регулятора или отдельного электронного устройства защиты.



Наиболее распространённая ошибка начинающего специалиста заключается в том, что он воспринимает АСУ ТП как синоним программируемого контроллера или, ещё чаще, как синоним SCADA-программы. Такое упрощённое

представление приводит к серьёзным практическим затруднениям, когда специалисту приходится анализировать неисправность, локализованную не в контроллере и не в диспетчерской программе, а, например, в датчике или в кабельной трассе.

1.1.2. АСУ ТП как «нервная система» промышленного объекта

Для формирования целостного представления об автоматизированной системе управления технологическим процессом полезно сравнивать АСУ ТП с нервной системой живого организма. Это сравнение не следует воспринимать как строгое научное соответствие: промышленная система и биологический организм имеют различную природу, принципы функционирования и степень сложности. Однако с педагогической точки зрения такая аналогия обладает высокой ценностью, поскольку позволяет на интуитивно понятном примере объяснить назначение датчиков, контроллера, исполнительных устройств и средств взаимодействия человека с машиной. В типовой структуре АСУ ТП датчики получают информацию о технологическом процессе, контроллер обрабатывает ее и формирует управляющие воздействия, а исполнительные механизмы изменяют состояние объекта управления.

АСУ ТП как живой организм



Датчики в этой аналогии выполняют функцию органов чувств живого организма. Они воспринимают изменения окружающей среды и внутреннего состояния объекта, после чего преобразуют их в сигналы, пригодные для передачи и обработки системой управления.

В технологическом процессе такими параметрами могут быть:

- температура;
- давление;
- расход жидкости или газа;
- уровень материала в резервуаре;
- положение механизма;
- частота вращения электродвигателя;
- вибрация;

- освещенность;
- концентрация вещества;
- наличие или отсутствие детали на рабочем месте.

Например, термопреобразователь измеряет температуру в печи, датчик давления контролирует давление в трубопроводе, энкодер определяет положение вала, а индуктивный датчик обнаруживает металлическую деталь. Сам датчик не принимает решения о том, что необходимо делать дальше. Его основная задача заключается в получении информации о физическом параметре и преобразовании этой информации в электрический или цифровой сигнал.

В зависимости от типа оборудования сигнал может передаваться в виде дискретного состояния «включено/выключено», аналогового сигнала 0–10 В или 4–20 мА, импульсной последовательности либо цифрового сообщения по промышленной сети. Таким образом, датчик можно рассматривать как своеобразный «рецептор» АСУ ТП: он не управляет процессом, а сообщает системе, что происходит с объектом.

Например, человек не «управляет» температурой только потому, что чувствует тепло. Он сначала получает информацию от органов чувств, затем оценивает ситуацию и только после этого совершает действие. Аналогично датчик передает контроллеру информацию о состоянии технологического объекта, но не определяет алгоритм управления.

Контроллер, особенно программируемый логический контроллер, можно условно сравнить с центральной нервной системой низшего уровня. Он получает сигналы от датчиков, обрабатывает их в соответствии с заданной программой и формирует команды для исполнительных устройств. В промышленной автоматизации ПЛК обычно выполняет функции сбора данных, логической обработки сигналов и выдачи управляющих воздействий.

Работа контроллера включает несколько последовательных операций:

- Считывание сигналов с входов и получение данных от удаленных модулей.
- Проверка и предварительная обработка измерительной информации.
- Сравнение текущих значений с заданными уставками.
- Выполнение логических условий, блокировок и защит.
- Расчет управляющего воздействия.
- Передача команд исполнительным механизмам.
- Обмен информацией с панелью оператора, SCADA-системой и другими устройствами.

Например, если датчик уровня сообщает о снижении уровня жидкости ниже установленного значения, контроллер может включить насос. Если давление превысит допустимый предел, ПЛК способен отключить привод, закрыть клапан и передать аварийное сообщение оператору.

Важной особенностью контроллера является то, что он действует по заранее разработанному алгоритму. Он не «размышляет» подобно человеку в широком смысле, а последовательно выполняет программу, учитывая входные сигналы, уставки, таймеры, счетчики, режимы работы и условия безопасности. Поэтому качество автоматического управления зависит не только от надежности самого ПЛК, но и от правильности разработанного алгоритма.

При этом контроллер нельзя полностью отождествлять со всем «мозгом» организма. В современной АСУ ТП функции управления распределены между ПЛК, системами противоаварийной защиты, приводами, SCADA, серверами, оператором и инженерными станциями. Поэтому более корректно говорить, что ПЛК соответствует локальному нервному центру, который обеспечивает быструю реакцию на изменения технологического процесса.

Исполнительные механизмы в данной аналогии подобны мышцам живого организма. Они получают команду от контроллера и преобразуют ее в физическое действие, непосредственно изменяющее состояние технологического объекта.

К исполнительным устройствам относятся:

- электродвигатели;
- электромагнитные клапаны;
- регулирующие клапаны;
- контакторы и пускатели;
- частотные преобразователи;
- пневматические и гидравлические цилиндры;
- сервоприводы;
- нагреватели;
- насосы;
- заслонки и шиберы;
- тормозные и позиционирующие устройства.

Например, контроллер может сформировать команду «увеличить скорость», но физически эта команда будет выполнена частотным преобразователем и электродвигателем. ПЛК может выдать сигнал на открытие клапана, однако фактическое перемещение штока осуществит электропривод или пневматический привод клапана.

Как и мышцы организма, исполнительные механизмы не определяют общую цель действия. Они выполняют поступившую команду в пределах своих технических возможностей. Если двигатель перегружен, клапан заклинил, в пневматической системе отсутствует давление или привод неисправен, команда контроллера может не привести к ожидаемому результату. Поэтому в АСУ ТП

обязательно предусматривается обратная связь: система должна получать подтверждение фактического состояния оборудования.

Например, команда на включение насоса должна сопровождаться сигналом от контактора, датчика вращения или датчика давления. Если насос получил команду, но не запустился, контроллер должен распознать несоответствие и сформировать предупреждение или аварийный сигнал.

Особенно полезно использовать биологическую аналогию для объяснения принципа обратной связи. Организм постоянно сравнивает ожидаемый результат с фактическим состоянием. Если человек касается горячей поверхности, нервная система быстро воспринимает воздействие и вызывает защитную реакцию. В автоматизированной системе аналогичный принцип реализуется посредством датчиков, программных алгоритмов и защитных устройств.

Рассмотрим простой пример поддержания температуры:

- датчик измеряет текущую температуру;
- контроллер сравнивает ее с заданной уставкой;
- исполнительное устройство изменяет подачу тепла;
- датчик снова измеряет температуру;
- контроллер корректирует воздействие.

Если задана температура 80 °С, а фактическое значение составляет 72 °С, система увеличивает мощность нагревателя или открывает клапан подачи теплоносителя. При приближении температуры к уставке управляющее воздействие уменьшается. Если же температура превышает допустимый предел, система отключает нагрев и может включить аварийную сигнализацию.

В этом случае АСУ ТП действует по замкнутому контуру управления. Информация о результате воздействия возвращается к контроллеру, поэтому система может не просто выполнять команды, а корректировать свои действия в зависимости от фактического состояния объекта.

Человеко-машинный интерфейс и диспетчерская система можно условно сопоставить с сознательным восприятием происходящих процессов. Через HMI оператор получает информацию о состоянии оборудования, а через SCADA-систему может наблюдать за работой отдельного агрегата, участка или всего предприятия.

На экране оператора обычно отображаются:

- текущие значения технологических параметров;
- состояние двигателей, клапанов и насосов;
- положение механизмов;
- аварийные и предупредительные сообщения;
- тренды изменения температуры, давления, расхода и других величин;
- активные уставки и режимы работы;
- результаты диагностики;
- журналы событий и архивы данных.

HMI можно сравнить со зрением и слухом человека, поскольку этот интерфейс делает невидимые электрические сигналы понятными оператору. На мнемосхеме оператор видит условное изображение технологической установки, а цвет, символ или сообщение показывают, работает ли оборудование, остановлено ли оно или находится в аварийном состоянии.

Однако аналогия с сознанием имеет важное ограничение. Оператор не обязательно управляет каждым действием системы вручную. Большинство

быстрых операций выполняется контроллером автоматически, тогда как человек задает режим, изменяет уставки, подтверждает аварии, анализирует тенденции и принимает решения в нестандартных ситуациях. НМІ обеспечивает взаимодействие человека с системой, но не заменяет автоматические алгоритмы управления.

Также важно, используя данную аналогию, не преувеличивать её точность. Нервная система живого организма обладает свойствами самообучения и адаптации, которых классическая АСУ ТП, за исключением отдельных современных решений с элементами анализа данных, не имеет. Аналогия служит исключительно для первичного формирования образа системы, а не как строгая техническая модель.

1.2. Многоуровневая структура АСУ ТП

1.2.1. Пятиуровневая модель системы управления

Наиболее удобной для изучения и практического применения является **пятиуровневая модель организации автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП)**. Она сложилась в инженерной практике как способ структурирования сложных систем автоматизации и позволяет последовательно рассматривать все этапы прохождения информации: от непосредственного измерения физических параметров технологического объекта до формирования аналитических выводов и управленческих решений.

Такая модель не всегда означает строгое физическое разделение оборудования по пяти отдельным этажам или шкафам. В реальных системах отдельные функции могут объединяться в одном устройстве, распределяться между несколькими контроллерами или выполняться облачными и серверными сервисами. Однако с точки зрения проектирования, наладки, эксплуатации и обучения пятиуровневая структура остается очень удобной, поскольку показывает

назначение каждого компонента, его место в общей системе и взаимосвязь с другими уровнями.



Первый уровень - полевой. К нему относятся датчики, измерительные преобразователи, исполнительные механизмы, кабельные и сигнальные соединения. Этот уровень непосредственно контактирует с технологическим объектом и обеспечивает превращение физической величины в электрический сигнал и обратное превращение команды в физическое действие.

Второй уровень - уровень локального управления. Основным техническим средством этого уровня является программируемый логический контроллер, реже - специализированный промышленный компьютер или встроенный регулятор. Этот уровень принимает решения в реальном времени на основе сигналов полевого уровня.

Третий уровень - операторский. К нему относится человеко-машинный интерфейс, представленный панелями оператора или локальными экранами, установленными непосредственно у технологической установки. Этот уровень обеспечивает прямое взаимодействие человека с конкретным участком процесса.

Четвёртый уровень - диспетчерский. Его образует SCADA-система, объединяющая данные от нескольких контроллеров и предоставляющая оператору или диспетчеру целостную картину состояния технологического процесса в масштабе цеха, участка или предприятия.

Пятый уровень - уровень цифрового расширения. Он включает архивные системы, edge-вычислительные узлы, средства промышленного интернета вещей и системы предиктивной диагностики, обеспечивающие анализ технологических данных за длительный период и прогнозирование состояния оборудования.

Таблица 1.1. Пятиуровневая структура АСУ ТП

Уровень	Название	Основные технические средства	Временной масштаб реакции
1	Полевой	Датчики, исполнительные механизмы	Миллисекунды
2	Локального управления	Программируемый контроллер	Миллисекунды - секунды
3	Операторский	Панель оператора, местный HMI	Секунды
4	Диспетчерский	SCADA-система	Секунды - минуты
5	Цифрового расширения	Архив, edge-узел, IoT-платформа	Минуты - сутки

Существенно важным для правильного понимания структуры является отдельное указание временного масштаба реакции каждого уровня. Опыт наладки промышленных систем убедительно демонстрирует: попытка возложить на верхний, диспетчерский уровень функции, требующие миллисекундной реакции - например, аварийную защиту оборудования, - приводит к серьёзным авариям, поскольку канал связи между полевым и диспетчерским уровнем никогда не гарантирует детерминированного времени доставки сообщения.

1.2.2. Взаимодействие уровней между собой

Каждый уровень системы взаимодействует с соседними уровнями через строго определённые интерфейсы, что обеспечивает модульность построения системы и возможность её независимой модернизации по частям.

Полевой уровень взаимодействует с уровнем локального управления через модули ввода-вывода контроллера, воспринимающие дискретные и аналоговые сигналы. Уровень локального управления взаимодействует с операторским уровнем через протоколы связи с панелями операторов, чаще всего реализуемые через последовательные интерфейсы или промышленный Ethernet. Операторский и локальный уровни взаимодействуют с диспетчерским уровнем через промышленные сети верхнего уровня, а диспетчерский уровень взаимодействует с уровнем цифрового расширения через протоколы передачи данных, ориентированные на структурированный обмен информацией, такие как OPC UA.

Такое разграничение функций и интерфейсов позволяет рассматривать АСУ ТП не как единый монолитный комплекс, все элементы которого жестко зависят друг от друга, а как совокупность взаимосвязанных, но относительно самостоятельных подсистем. Каждая подсистема выполняет определенную группу задач, использует соответствующее оборудование и программное обеспечение, а также обменивается с соседними уровнями только той информацией,

которая необходима для совместной работы. При этом связь между уровнями строится через заранее определенные интерфейсы, протоколы и форматы данных, что упрощает понимание структуры системы и делает ее более предсказуемой при эксплуатации, диагностике и модернизации.

Каждый уровень АСУ ТП имеет собственную область ответственности и сохраняет определенную степень автономности. Полевые устройства измеряют параметры технологического процесса и воздействуют на оборудование, уровень локального управления выполняет алгоритмы регулирования и логического управления, операторский уровень обеспечивает непосредственное взаимодействие персонала с системой, а диспетчерский и цифровой уровни выполняют задачи централизованного наблюдения, архивирования, анализа и интеграции. Благодаря такому распределению функций отказ или изменение одного компонента не обязательно приводит к прекращению работы всей системы. Например, при временной недоступности SCADA-сервера локальный контроллер может продолжать выполнять программу управления, поддерживать заданные параметры и обеспечивать работу защитных блокировок.

Модульный принцип построения существенно упрощает модернизацию АСУ ТП. Изменение одного уровня не обязательно требует полной замены оборудования, кабельных связей и программных алгоритмов на всех остальных уровнях. Можно заменить операторскую панель на более современную модель, обновить SCADA-систему, расширить архив технологических данных или подключить дополнительный аналитический сервис, сохранив без изменений датчики, исполнительные механизмы и программу контроллера. При этом новое оборудование должно поддерживать необходимые протоколы и соответствовать требованиям к электрическим сигналам, скорости обмена, безопасности и совместимости.

Особенно важное значение модульность приобретает при поэтапном развитии предприятия. На первом этапе может быть создана базовая система локального управления, обеспечивающая надежную работу технологического оборудования. Затем к ней подключаются операторские панели, диспетчерская визуализация, архивирование, производственная отчетность и цифровые инструменты анализа. Такой подход позволяет распределять затраты во времени, учитывать результаты эксплуатации и модернизировать систему без длительной остановки производства. Кроме того, поэтапное внедрение снижает риск ошибок, поскольку каждое изменение можно проверять отдельно, не затрагивая уже устойчиво работающие подсистемы.

Модульность также облегчает техническое обслуживание и поиск неисправностей. Если между уровнями существуют четко определенные границы, инженер может последовательно проверить датчики, модули ввода-вывода, контроллер, сеть, операторскую станцию и серверное оборудование. Это позволяет быстрее определить, где именно возникла проблема: в измерительном канале, алгоритме управления, линии связи, программном обеспечении или верхнем уровне системы. В результате повышается ремонтпригодность АСУ ТП, сокращается время простоя оборудования и упрощается обучение эксплуатационного персонала.

1.3. Функции автоматизированной системы управления технологическим процессом

1.3.1. Основные группы функций

Функции АСУ ТП принято разделять на несколько основных групп в зависимости от их назначения, характера выполняемых операций и места в общей структуре системы. Такое разделение позволяет упорядочить большое количество задач, которые решает автоматизированная система, и установить связь

между конкретной функцией и техническими средствами, обеспечивающими ее выполнение. Для обучающегося это особенно важно, поскольку АСУ ТП включает датчики, модули ввода-вывода, контроллеры, исполнительные механизмы, операторские панели, SCADA-серверы, сети передачи данных и средства защиты. Если рассматривать все эти элементы одновременно, структура системы может показаться чрезмерно сложной. Разделение функций на информационные, управляющие и вспомогательные помогает последовательно понять, что именно делает система, какие данные она получает, какие решения принимает и каким образом обеспечивает собственную надежность.

Такое деление имеет не только учебное, но и практическое значение. На стадии проектирования оно позволяет определить состав оборудования, выбрать необходимые датчики и исполнительные устройства, рассчитать количество каналов ввода-вывода, определить требования к контроллерам и сетевой инфраструктуре. При эксплуатации функциональная классификация помогает анализировать работу АСУ ТП, искать причины неисправностей и оценивать последствия отказов. Например, отсутствие значения температуры на экране оператора может быть связано с информационной функцией, тогда как невозможность автоматически отключить двигатель относится уже к управляющей функции. Отказ резервного источника питания, нарушение синхронизации времени или попытка несанкционированного доступа затрагивают вспомогательные функции системы.

Три группы функций АСУ ТП.

По назначению: информация, управление, работоспособность системы.



Таблица 1.2. Классификация функций АСУ ТП с примерами реализации

Группа функций	Примеры конкретных функций	Уровень реализации
Информационные	Измерение давления, архивирование температуры	Полевой, диспетчерский
Управляющие	Регулирование уровня, аварийный останов насоса	Локальный, полевой
Вспомогательные	Диагностика обрыва датчика, резервирование контроллера	Локальный, диспетчерский

Информационные функции

Информационные функции обеспечивают получение, обработку, передачу, хранение и представление данных о состоянии технологического процесса. Именно благодаря этим функциям система получает сведения о том, что происходит с оборудованием и регулируемыми параметрами. Источниками информации являются датчики, измерительные преобразователи, счетчики, энкодеры, устройства контроля положения, системы технической диагностики и другие полевые устройства. Их сигналы поступают в модули аналогового или дискретного ввода контроллера, где преобразуются в значения, пригодные для дальнейшей обработки.

К информационным функциям относится измерение технологических параметров: температуры, давления, расхода, уровня, влажности, скорости вращения, положения механизма, электрического тока и напряжения. Однако АСУ ТП не ограничивается простым считыванием сигналов. Контроллер или сервер может выполнять масштабирование измерительного сигнала, фильтрацию помех, проверку диапазона, коррекцию нелинейности, контроль обрыва линии и оценку достоверности полученных данных. Например, сигнал 4–20 мА может быть преобразован в диапазон от 0 до 100 °С, после чего система проверит, не вышло ли значение за допустимые границы и не возникла ли неисправность измерительного канала.

К информационным функциям также относится вычисление производных и косвенных величин. Некоторые параметры невозможно или экономически нецелесообразно измерять непосредственно, поэтому их рассчитывают на основе других данных. Система может вычислять среднее значение температуры, разность давлений, расход за смену, суммарное энергопотребление, коэффициент загрузки двигателя, скорость изменения параметра или отклонение текущего значения от заданной уставки. Такие расчетные величины помогают оператору и инженерному персоналу оценивать не только текущее состояние объекта, но и динамику его работы.

Важной информационной функцией является формирование сигналов тревог и предупреждений. Система сравнивает текущие значения с установленными пределами и определяет, соответствует ли режим нормальному состоянию. При превышении предупредительного уровня оператор может получить сообщение о необходимости обратить внимание на процесс. При достижении аварийного предела могут одновременно формироваться визуальный и звуковой сигналы, записываться событие в журнал и передаваться команда на защитное отключение оборудования. При этом важно различать предупредительные сообщения, аварийные сигналы и диагностические уведомления. Предупреждение сообщает о приближении к опасной зоне, авария указывает на уже возникшее недопустимое состояние, а диагностика может информировать о неисправности датчика, сети или модуля ввода-вывода.

К информационным функциям относятся регистрация событий и архивирование данных. Система фиксирует включение и отключение оборудования, изменение режимов, срабатывание защит, подтверждение аварий, действия оператора и изменение уставок. Архивирование позволяет просматривать историю технологических параметров, строить тренды, выявлять повторяющиеся отклонения и анализировать причины аварий. Например, по графику давления можно определить, что остановка насоса была вызвана не случайным сбоем, а постепенным ухудшением работы фильтра или увеличением нагрузки на трубопровод.

Представление информации выполняется через человеко-машинный интерфейс, операторские панели, диспетчерские рабочие места, отчеты и мобильные приложения. Данные должны отображаться не просто в большом объеме, а в форме, удобной для восприятия и принятия решений. На экране показывают текущие значения, состояния механизмов, направления потоков, активные аварии и основные уставки. Хорошо организованная визуализация позволяет

быстро отличить нормальный режим от предупредительного или аварийного и не перегружает оператора второстепенной информацией.

Управляющие функции

Управляющие функции предназначены для формирования воздействий на технологический объект и изменения его состояния в соответствии с заданным алгоритмом. Если информационная часть отвечает на вопрос «что происходит?», то управляющая функция отвечает на вопрос «что необходимо сделать?». Управляющее воздействие может быть сформировано автоматически по программе контроллера, по команде оператора, на основании результата регулирования или в результате срабатывания защитной логики.

Одной из наиболее простых управляющих функций является дискретное управление. Оно заключается во включении и отключении оборудования, открытии и закрытии клапанов, запуске и остановке конвейеров, переключении контакторов и изменении состояния других исполнительных устройств. Например, при снижении уровня жидкости ниже минимальной отметки контроллер включает насос, а после достижения верхнего уровня отключает его. Несмотря на простоту, дискретное управление часто включает дополнительные условия: разрешение пуска, задержку включения, контроль обратной связи, защиту от частых повторных запусков и блокировку при неисправности.

Более сложной функцией является регулирование, при котором система поддерживает технологический параметр около заданного значения. Контроллер сравнивает текущую величину с уставкой, определяет рассогласование и рассчитывает управляющее воздействие. Так могут регулироваться температура в печи, давление в трубопроводе, скорость электродвигателя, уровень жидкости или расход сырья. Для этого используются двухпозиционные, пропорциональные, интегральные, дифференциальные и комбинированные регуляторы.

В промышленной практике часто применяются П-, ПИ- и ПИД-алгоритмы, параметры которых должны быть согласованы с динамическими свойствами технологического объекта.

Управляющие функции также включают программно-логическое управление последовательностью операций. Оно необходимо в тех случаях, когда технологический процесс состоит из нескольких взаимосвязанных этапов. Например, перед запуском насоса необходимо открыть соответствующий клапан, проверить наличие рабочей жидкости, убедиться в исправности двигателя и только после этого подать команду на пуск. При остановке действия выполняются в другой последовательности: сначала снижается нагрузка, затем отключается двигатель, после чего закрывается клапан. Такая логика может быть реализована в виде пошаговой программы, графа состояний, последовательностного функционального блока или набора условий в программе ПЛК.

Программно-логическое управление особенно важно для автоматизации станков, конвейерных линий, упаковочных машин, роботизированных комплексов и насосных станций. Здесь необходимо учитывать взаимное положение механизмов, завершение предыдущих операций, наличие заготовки, разрешающие сигналы и время выполнения каждого шага. Если одно из условий не выполнено, контроллер должен остановить последовательность или перевести оборудование в безопасное состояние. Таким образом, управляющая функция включает не только выдачу команды, но и проверку того, что команда может быть выполнена без нарушения технологического процесса.

Отдельное место занимает аварийная защита. Ее задача заключается в предотвращении развития опасной ситуации или уменьшении последствий уже возникшего отказа. При превышении давления, перегреве двигателя, исчезновении охлаждения, открытии защитной двери или обнаружении неисправности привода система может отключить оборудование, закрыть клапан, прекратить

подачу материала и сформировать сигнал оператору. Аварийная защита должна быть максимально независимой от второстепенных функций визуализации и архивирования. В критически важных системах для нее применяются специальные защитные цепи, независимые контроллеры и резервированные измерительные каналы.

При реализации управляющих функций важно учитывать режимы работы оборудования: автоматический, ручной, наладочный, дистанционный и аварийный. В ручном режиме оператор получает возможность управлять механизмом непосредственно, но даже в этом случае должны сохраняться необходимые блокировки и защиты. Например, ручная команда на включение двигателя не должна выполняться при открытой защитной двери, отсутствии смазки или превышении допустимой температуры. Это позволяет сочетать гибкость управления с требованиями безопасности.

Вспомогательные функции

Вспомогательные функции обеспечивают работоспособность, надежность, безопасность и обслуживаемость самой системы управления. Они не всегда воздействуют на технологический объект напрямую, однако без них АСУ ТП может постепенно потерять устойчивость, достоверность или способность правильно выполнять основные алгоритмы. К этой группе относятся самодиагностика, резервирование, синхронизация времени, управление конфигурацией, защита информации и контроль состояния сетевой инфраструктуры.

Самодиагностика позволяет выявлять неисправности технических средств и каналов обмена. Контроллер может контролировать состояние процессора, памяти, модулей ввода-вывода, источников питания и коммуникационных интерфейсов. Дополнительно проверяется наличие сигнала от датчика, соответствие значения допустимому диапазону, исправность сетевого соединения и получение подтверждения от исполнительного механизма. Например,

если контроллер выдал команду на запуск двигателя, но не получил сигнал обратной связи, система может сформировать сообщение о неудачном пуске или неисправности привода.

Важную роль играет резервирование. Оно может распространяться на контроллеры, источники питания, сетевые коммутаторы, каналы связи, серверы, датчики и исполнительные устройства. При отказе основного компонента резервный элемент принимает на себя его функции или обеспечивает продолжение работы в ограниченном режиме. Резервирование особенно необходимо для непрерывных производств, энергетических объектов, опасных технологических установок и систем, остановка которых приводит к значительным потерям. При этом резервирование должно быть правильно организовано: недостаточно установить два одинаковых устройства, необходимо обеспечить их согласованную работу, контроль исправности и безопасное переключение.

Синхронизация времени обеспечивает единое временное представление событий во всех узлах АСУ ТП. Это необходимо для правильного анализа аварийных ситуаций, сопоставления действий оператора с изменениями параметров и построения достоверной последовательности событий. Если часы контроллера, SCADA-сервера и сетевого оборудования показывают разное время, инженер может неправильно определить причину аварии или последовательность срабатывания защит. Поэтому на предприятиях применяются специальные серверы времени и протоколы синхронизации, позволяющие согласовать работу разных устройств.

К вспомогательным функциям относится защита от несанкционированного доступа. Она включает идентификацию пользователей, разграничение прав, использование паролей, регистрацию действий операторов, защиту программ контроллеров и контроль подключения внешних устройств. Оператору может быть разрешено подтверждать аварии и изменять рабочие уставки, но

запрещено редактировать программу ПЛК. Инженер по автоматизации может иметь расширенные права, однако все его действия должны регистрироваться и выполняться по установленному регламенту.

Защита должна учитывать не только внешние атаки, но и обычные ошибки персонала. Неправильно введенная уставка, случайный переход в ручной режим или изменение параметров регулятора может привести к нарушению технологического процесса. Поэтому важны ограничения диапазонов, подтверждение критических команд, блокировка опасных операций и возможность восстановления проверенной конфигурации. Надежная система должна защищать оборудование не только от злоумышленников, но и от случайных действий пользователя.

Взаимосвязь функций

Информационные, управляющие и вспомогательные функции не существуют изолированно. Они образуют единый цикл работы АСУ ТП. Сначала датчики и измерительные устройства получают сведения о состоянии объекта. Затем система обрабатывает эти данные, проверяет их достоверность и передает контроллеру. Контроллер сравнивает текущие значения с уставками, выполняет алгоритм управления и формирует воздействие на исполнительный механизм. После этого результат снова контролируется датчиками, а информация о процессе передается оператору и записывается в архив.

Вспомогательные функции сопровождают этот цикл на всех этапах. Диагностика проверяет исправность каналов, резервирование поддерживает работоспособность при отказах, синхронизация времени обеспечивает достоверную регистрацию событий, а средства защиты ограничивают доступ к управлению. Благодаря этому АСУ ТП не только управляет технологическим процессом, но и контролирует собственное состояние, выявляет неисправности и сохраняет способность работать в нештатных условиях.

1.3.2. Практический пример распределения функций

Рассмотрим распределение функций на примере насосной станции подачи технологической жидкости - объекта, который будет использоваться в качестве сквозного практического проекта на протяжении всего пособия.

Информационная функция реализуется через измерение уровня жидкости в приёмном резервуаре с помощью гидростатического датчика уровня, измерение давления на выходе насоса с помощью тензометрического датчика давления и измерение температуры подшипникового узла насоса с помощью термопреобразователя сопротивления.

Управляющая функция реализуется через алгоритм, поддерживающий заданный уровень жидкости в резервуаре путём включения и отключения насоса, а также через алгоритм аварийной защиты, останавливающий насос при превышении допустимой температуры подшипникового узла или при падении уровня жидкости ниже минимально допустимого значения, исключающего работу насоса «на сухом ходу».

Вспомогательная функция реализуется через периодическую проверку исправности датчика уровня методом сравнения его показаний с расчётным значением, ожидаемым исходя из времени работы насоса, а также через дублирование канала аварийной защиты по температуре независимым термовыключателем, не зависящим от программы контроллера.

Данный пример наглядно демонстрирует педагогический приём, который будет использоваться на протяжении всего пособия: любое теоретическое положение сопровождается конкретным техническим примером, позволяющим обучающемуся увидеть практическое применение изучаемого материала.

1.4. Разграничение АСУ ТП со смежными понятиями

1.4.1. АСУ ТП и система автоматического управления

Начинающие специалисты часто путают понятия «система автоматического управления» и «автоматизированная система управления технологическим процессом», поскольку в обоих случаях используются датчики, контроллеры, регуляторы и исполнительные механизмы. Однако между этими понятиями существует принципиальное различие, связанное прежде всего с ролью человека в процессе управления. В одном случае система способна самостоятельно выполнять весь замкнутый цикл управления, а в другом технические средства автоматизации дополняют деятельность оператора и передают ему часть функций контроля, выбора режима и принятия решений.



Система автоматического управления функционирует без непосредственного участия человека на всех основных этапах своей работы: от измерения текущего состояния объекта до формирования и реализации управляющего воздействия. Датчик получает информацию о технологическом параметре, регулятор сравнивает ее с заданным значением, рассчитывает необходимое воздействие и передает команду исполнительному механизму. После этого результат воздействия снова измеряется, а система автоматически корректирует свою работу. Человек может установить начальную уставку, выполнить настройку или провести техническое обслуживание, но в нормальном режиме он не участвует в каждом цикле управления.

Классическим примером системы автоматического управления является терморегулятор бытового холодильника. Пользователь устанавливает требуемую температуру, после чего датчик периодически измеряет температуру внутри камеры. Если она становится выше установленного значения, регулятор включает компрессор. После достижения необходимого уровня охлаждения компрессор отключается. Все основные действия выполняются автоматически, без постоянного наблюдения и принятия решений пользователем. Аналогичным образом могут работать локальные контуры стабилизации температуры, давления, уровня или скорости, если они не требуют вмешательства оператора в штатном режиме.

Автоматическая система может иметь достаточно сложный алгоритм, включать несколько датчиков, регуляторов и исполнительных устройств, выполнять самодиагностику и реагировать на отклонения параметров. Однако ее главным признаком остается отсутствие человека в непосредственном контуре принятия решений. Если система получает входной сигнал, самостоятельно обрабатывает его по заданному алгоритму и формирует управляющее воздей-

ствие, то такой контур относится к автоматическому управлению. При этом человек может контролировать его работу снаружи, но его участие не является обязательным для выполнения каждого управляющего цикла.

АСУ ТП, в отличие от системы автоматического управления, обязательно включает человека-оператора на определенных этапах контроля и принятия решений. Автоматизированная система не просто самостоятельно регулирует отдельный параметр, а обеспечивает управление более сложным технологическим объектом, производственным участком или всей установкой. Она объединяет измерительные устройства, контроллеры, исполнительные механизмы, операторские панели, SCADA-системы, архивы, средства диагностики и организационные процедуры, в рамках которых действует персонал.

Оператор технологической установки может изменить задание регулятору, выбрать рабочий режим, разрешить или запретить пуск оборудования, подтвердить аварийное сообщение, перевести агрегат из автоматического режима в ручной или принять решение об остановке процесса при обнаружении неисправности. В некоторых ситуациях система самостоятельно выполняет защитное отключение, но дальнейшее решение о восстановлении работы принимает человек. Оператор также оценивает совокупность факторов, которые трудно полностью формализовать в программе: качество продукции, состояние оборудования, наличие персонала, особенности текущей производственной ситуации и последствия возможного изменения режима.

Человек в АСУ ТП может участвовать не в каждом отдельном цикле регулирования, а на более высоком уровне управления. Например, контроллер самостоятельно поддерживает давление в трубопроводе, а оператор задает требуемое давление, выбирает режим работы насосной станции и реагирует на аварийные сообщения. Таким образом, автоматизация освобождает человека от постоянного выполнения повторяющихся операций, но сохраняет за ним функции

наблюдения, оценки ситуации, выбора стратегии и вмешательства в нестандартных случаях.

Важно понимать, что внутри АСУ ТП могут функционировать отдельные полностью автоматические контуры управления. Например, контур поддержания давления пара в котле может работать без постоянного участия оператора. Датчик давления передает информацию контроллеру, регулятор сравнивает измеренное значение с уставкой, а исполнительный механизм изменяет подачу топлива, воздуха или пара. Пока параметр находится в допустимых пределах, система самостоятельно выполняет регулирование.

Однако наличие таких автоматических контуров не превращает всю АСУ ТП в систему автоматического управления. Автоматическим является только конкретный контур или отдельная функция, тогда как вся система в целом остается автоматизированной, поскольку включает точки принятия решений человеком. Оператор может изменить уставку, выбрать другой алгоритм, перевести оборудование в ручной режим, подтвердить разрешение на запуск или остановить процесс по результатам анализа информации, представленной системой.

Различие между двумя понятиями можно выразить следующим образом: система автоматического управления самостоятельно выполняет замкнутый цикл управления объектом, а АСУ ТП автоматизирует управление технологическим процессом, сохраняя за человеком функции контроля, выбора режима и принятия решений. Поэтому автоматизация не означает полного исключения человека. Ее задача заключается в рациональном распределении функций между техническими средствами и персоналом: повторяющиеся, быстрые и формализуемые операции передаются автоматике, а оценка сложных ситуаций, изменение целей и принятие ответственных решений остаются за оператором и инженерным персоналом.

1.4.2. АСУ ТП и MES-системы

Ещё одна распространённая путаница возникает при разграничении АСУ ТП и систем управления производством класса MES (Manufacturing Execution System). Разграничение этих понятий особенно важно для настоящего пособия, поскольку MES-системы, хотя формально относятся к производственному, а не к финансовому уровню, всё же выходят за рамки материала, рассматриваемого в данном издании.

АСУ ТП решает задачи непосредственного управления технологическим оборудованием в реальном или близком к реальному масштабе времени - секунды, минуты. MES-система решает задачи производственного учёта и планирования в масштабе смены, суток - учёт выпущенной продукции, контроль соответствия партии материала технологическому регламенту, формирование производственных отчётов.

Границу между АСУ ТП и MES-системой удобно проводить по критерию: если задача решается путём непосредственного измерения и управления физическим оборудованием - это область АСУ ТП; если задача решается путём агрегирования и учёта уже полученных данных для целей производственного планирования - это область MES. Настоящее пособие сознательно останавливается на границе этого перехода, рассматривая архивирование и цифровое расширение АСУ ТП лишь до той степени, до которой они служат целям диагностики и анализа технологического процесса, но не переходя к производственному учёту, планированию, документообороту, финансовому и управленческому учёту, относящимся к системам более высокого организационного уровня.

Промт для иллюстрации: «Горизонтальная схема из четырёх прямоугольников, соединённых стрелками слева направо: "Полевые устройства" → "АСУ ТП (контроллеры, SCADA, edge)" → "MES (производственный учёт)" → "ERP (финансы, документооборот)". Первые два прямоугольника выделены толстой

сплошной рамкой и лёгкой штриховкой с подписью "Рассматривается в пособии", последние два - тонкой пунктирной рамкой с подписью "За рамками пособия". Цветная схема».



Границы содержания пособия в структуре уровней управления предприятием

1.5. Классификация АСУ ТП

1.5.1. Классификация по степени участия человека

По степени участия человека в контуре управления АСУ ТП подразделяются на системы с ручным управлением при автоматизированном контроле, системы с автоматическим управлением отдельными контурами при общем диспетчерском наблюдении и системы с максимальной степенью автоматизации,

при которой участие человека сводится к надзору и принятию решений в нестандартных ситуациях.

1.5.2. Классификация по характеру технологического процесса

По характеру протекания технологического процесса системы управления принято разделять на системы управления непрерывными, дискретными и непрерывно-дискретными, или циклическими, процессами. Такая классификация показывает, каким образом изменяются технологические параметры во времени, как поступает сырье и формируется готовая продукция, а также какие алгоритмы управления должны быть реализованы в контроллере. Выбор типа системы оказывает непосредственное влияние на структуру АСУ ТП, состав датчиков и исполнительных механизмов, требования к программному обеспечению и способ взаимодействия оператора с оборудованием. В инженерной практике также используется понятие периодических, или пакетных, процессов, которые занимают промежуточное положение между непрерывным и дискретным производством.

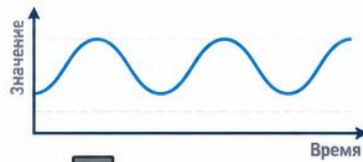
Таблица 1.3. Классификация технологических процессов и особенности их автоматизации

Тип процесса	Пример объекта	Особенность управления
Непрерывный	Печь, реактор, теплообменник	Регулирование, поддержание уставки
Дискретный	Конвейер, сборочная линия	Последовательность состояний, конечный автомат
Циклический	Дозатор, упаковочная машина	Повторяющийся цикл с этапами

Классификация АСУ ТП по характеру технологического процесса

Непрерывные, дискретные и непрерывно-дискретные процессы

1. Непрерывные процессы

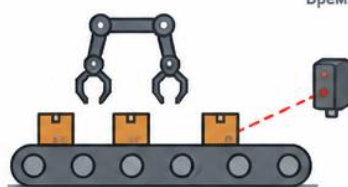
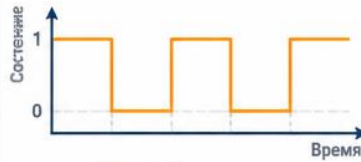


Величина меняется плавно и поддерживается в диапазоне.



Пример: Температура в печи

2. Дискретные процессы

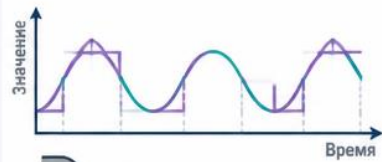


Объект переходит из состояния в состояние.



Пример: Конвейерная линия сборки

3. Непрерывно-дискретные (циклические)



Непрерывный процесс + дискретный цикл.



Пример: Дозирующая установка



Непрерывные → Дискретные → Циклические:
от плавного регулирования к сочетанию непрерывности и цикла.

Непрерывные процессы

Системы управления непрерывными процессами применяются в тех случаях, когда сырье, энергия или рабочая среда поступают в установку непрерывным потоком, а технологические параметры изменяются преимущественно плавно. Процесс может продолжаться длительное время без остановки, а его основная задача заключается в поддержании заданного режима в определенном диапазоне. К таким параметрам относятся температура, давление, расход, уровень, концентрация, влажность, скорость вращения и другие величины, способные принимать множество значений.

Характерной особенностью непрерывного процесса является наличие длительных установившихся и переходных режимов. В установившемся ре-

жиме температура, давление или расход изменяются незначительно и удерживаются около заданных значений. При изменении задания, нагрузки или внешних условий возникает переходный процесс, во время которого система постепенно переходит к новому состоянию. Поэтому главной задачей управления здесь обычно является регулирование, то есть автоматическое поддержание технологической величины около заданной уставки.

Примером непрерывного процесса может служить управление температурой в промышленной печи. Датчик постоянно измеряет температуру рабочей зоны, контроллер сравнивает ее с заданным значением, а исполнительный механизм изменяет подачу топлива, мощность нагревателя или расход теплоносителя. Если температура снижается, система увеличивает подвод энергии, а при приближении к уставке уменьшает управляющее воздействие. Такой цикл измерения и корректировки повторяется постоянно, обеспечивая стабилизацию режима.

К непрерывным процессам относятся также очистка воды, производство пара, нефтепереработка, химические реакции, производство бумаги, стекла, цемента и электроэнергии. В подобных производствах остановка оборудования может быть сложной, дорогостоящей или опасной, поэтому АСУ ТП должна обеспечивать плавное регулирование параметров, своевременное обнаружение отклонений и безопасное прохождение переходных режимов. Основными средствами управления являются аналоговые датчики, регулирующие клапаны, частотные преобразователи, ПИД-регуляторы, распределенные системы управления и промышленные контроллеры.

Для непрерывных процессов особенно важны точность измерений и качество регулирования. Ошибка датчика, неправильная настройка регулятора или запаздывание управляющего воздействия могут привести к колебаниям параметра, снижению качества продукции, перерасходу сырья и энергии. Поэтому

при проектировании учитывают динамические свойства объекта, инерционность оборудования, транспортное запаздывание, диапазон измерения и скорость реакции исполнительных механизмов. Кроме того, предусматриваются аварийные пределы, при достижении которых система должна ограничить режим или перевести установку в безопасное состояние.

Дискретные процессы

Системы управления дискретными процессами применяются в производстве отдельных изделий, деталей, узлов или последовательностей операций. В таком процессе объект переходит из одного четко определенного состояния в другое, а отдельные действия обычно можно описать командами «включить», «отключить», «открыть», «закрыть», «переместить», «зажать» или «освободить». В отличие от непрерывного процесса, здесь важную роль играет не столько плавное поддержание значения, сколько правильное выполнение последовательности операций и своевременная реакция на события.

Например, конвейерная линия сборки может включать подачу заготовки, остановку изделия в рабочей позиции, фиксацию детали, выполнение операции, освобождение зажимов и перемещение изделия на следующий участок. Каждая стадия начинается только после выполнения определенных условий. Датчики положения подтверждают прибытие детали, концевые выключатели контролируют положение механизма, а контроллер определяет, можно ли переходить к следующему шагу.

В дискретных процессах состояния оборудования часто имеют конечное число вариантов. Механизм может находиться в исходном положении, двигаться вперед, достигать конечного положения, возвращаться назад или находиться в аварийном состоянии. Клапан может быть открыт или закрыт, двига-

тель — включен или отключен, зажим — зафиксирован или освобожден. Поэтому программа управления строится вокруг логических условий, межблокировок, таймеров, счетчиков и переходов между состояниями.

Основным алгоритмом для дискретного производства является программно-логическое управление. Контроллер проверяет, выполнены ли условия запуска, получает сигналы от датчиков и выдает команды исполнительным механизмам в заданной последовательности. Если необходимый сигнал не поступил в установленное время, система должна остановить операцию и сформировать диагностическое сообщение. Например, если цилиндр не достиг конечного положения, следующий механизм не должен запускаться, поскольку это может привести к столкновению или повреждению оборудования.

Дискретные процессы характерны для машиностроения, приборостроения, сборочного производства, упаковки, сортировки и роботизированных комплексов. Их продукцией являются отдельные изделия или партии изделий, каждое из которых можно посчитать и идентифицировать. Для управления такими объектами широко применяются ПЛК, панели оператора, промышленные роботы, сервоприводы, системы технического зрения и контроллеры движения. Важными критериями качества являются правильность последовательности, точность позиционирования, время цикла и отсутствие пропусков или повторов операций.

Непрерывно-дискретные процессы

Системы управления непрерывно-дискретными, или циклическими, процессами применяются в ситуациях, когда в одном технологическом объекте сочетаются непрерывное изменение параметров и дискретная последовательность операций. Такой процесс может включать плавное регулирование температуры, давления, скорости или расхода, но при этом запускаться, останавливаться и повторяться отдельными циклами. В инженерной практике к этой группе

близки периодические и пакетные процессы, при которых продукция выпускается определенными порциями по заданной рецептуре.

Типичным примером является дозирующая установка. В течение каждого цикла необходимо открыть клапан, подать определенное количество материала, непрерывно контролировать расход или массу, затем закрыть клапан и перейти к следующему компоненту. Сам процесс дозирования может происходить плавно, поскольку масса или расход постепенно изменяются, но структура операции остается дискретной: начинается новый цикл, выполняется отдельный шаг, достигается заданная доза, после чего происходит переход к следующему этапу.

Другим примером является установка приготовления смеси. Сначала контроллер принимает команду на запуск рецепта, затем открывает клапаны подачи компонентов, контролирует их количество, закрывает подачу, включает мешалку и поддерживает температуру в заданном диапазоне. После завершения перемешивания система выполняет слив готового продукта и переходит к следующему циклу. В этой установке непрерывными являются регулирование температуры, скорости мешалки или расхода, а дискретными — открытие клапанов, начало дозирования, завершение выдержки и переход между стадиями.

Для управления непрерывно-дискретными процессами необходимо объединить несколько типов алгоритмов. Контроллер должен поддерживать аналоговые параметры с помощью регуляторов, одновременно выполняя последовательностную логику, обработку событий, управление режимами и контроль времени. Программа может быть организована в виде шагов технологического цикла, графа состояний, рецептурного управления или набора функциональных блоков. На каждом шаге задаются условия входа, необходимые действия, контролируемые параметры и условия перехода к следующему шагу.

Особую роль в таких системах играет синхронизация непрерывных и дискретных функций. Например, нагрев может выполняться только после подтверждения наличия материала, перемешивание — только после закрытия загрузочного клапана, а слив — только после завершения выдержки и достижения безопасной температуры. Если нарушается хотя бы одно условие, цикл должен быть приостановлен, а оператору необходимо сообщить о причине остановки. Это требует тщательной разработки межблокировок и анализа всех возможных переходов между состояниями.

Сравнение типов процессов

Непрерывные, дискретные и непрерывно-дискретные процессы отличаются прежде всего характером изменения параметров, способом формирования продукции и основным типом управления. В непрерывном процессе главной задачей является стабилизация величин во времени, в дискретном — выполнение правильной последовательности операций, а в циклическом — одновременное обеспечение регулирования и пошагового управления.

Для непрерывного производства основными объектами контроля являются температура, давление, расход и уровень. Для дискретного производства более важны положение механизмов, наличие деталей, состояние приводов и выполнение отдельных операций. В непрерывно-дискретных системах используются оба типа сигналов и алгоритмов: аналоговые каналы обеспечивают регулирование параметров, а дискретные сигналы определяют запуск, остановку, завершение этапов и переходы между состояниями.

На практике границы между данными группами не всегда являются абсолютно строгими. Даже в непрерывном производстве имеются дискретные операции, например запуск, остановка, переключение насосов или срабатывание защит. В дискретной линии могут присутствовать непрерывные контуры регулирования скорости, температуры или давления. Поэтому при классификации

обычно определяют, какой характер является преобладающим и какие задачи имеют наибольшее значение для управления объектом.

Значение классификации

Классификация технологических процессов необходима для правильного выбора структуры АСУ ТП и программных средств. Для непрерывного процесса потребуется уделить особое внимание точности измерений, настройке регуляторов, качеству аналоговых сигналов и устойчивости контуров. Для дискретного процесса важнее разработать последовательность операций, состояния оборудования, межблокировки, временные задержки и обработку событий. Для непрерывно-дискретного процесса необходимо согласовать оба подхода и обеспечить их совместную работу в единой программе контроллера.

1.5.3. Классификация по масштабу и территориальному признаку

По масштабу и территориальной распределённости АСУ ТП подразделяются на локальные, цеховые и распределённые системы. Такая классификация позволяет оценить размеры объекта автоматизации, количество технологических установок, расстояние между ними, структуру информационных связей и необходимый уровень централизации управления. Чем крупнее предприятие и чем дальше друг от друга расположены его технологические объекты, тем более сложной становится организация каналов связи, диспетчеризации, резервирования и обмена данными. При этом границы между типами систем могут быть условными: локальная система может постепенно расширяться до уровня цеховой, а цеховые системы — объединяться в единую распределённую АСУ ТП.

Классификация АСУ ТП по масштабу и территориальной распределённости

Локальные, цеховые и распределённые системы



Локальные системы

Локальная АСУ ТП предназначена для управления одной технологической установкой, машиной, агрегатом или небольшим функционально завершённым объектом. Обычно все основные технические средства такой системы размещаются в пределах одного помещения, производственной зоны или компактного участка. К локальным объектам можно отнести отдельную насосную

установку, вентиляционную систему, котельную, станок, упаковочную машину, роботизированный участок, узел дозирования или небольшую установку подготовки воды.

В состав локальной системы входят датчики, исполнительные механизмы, шкаф управления, модули ввода-вывода, программируемый контроллер, панель оператора и необходимые устройства связи. Контроллер получает информацию от датчиков, обрабатывает ее в соответствии с программой и формирует команды для двигателей, клапанов, нагревателей, приводов и других исполнительных устройств. Оператор взаимодействует с системой через локальную панель, на которой отображаются параметры процесса, состояние механизмов, аварийные сообщения и текущий режим работы.

Главным преимуществом локальной системы является простота построения и небольшая протяженность коммуникаций. Датчики и исполнительные устройства располагаются рядом со шкафом управления, поэтому можно использовать короткие кабельные линии и ограниченное количество сетевых соединений. Это упрощает монтаж, наладку, техническое обслуживание и диагностику. При необходимости локальная система может работать автономно, не завися от центрального диспетчерского сервера или внешней информационной сети.

Однако локальные системы имеют ограниченный масштаб. Если необходимо объединить несколько установок, передавать данные в общую диспетчерскую, формировать производственные отчеты или координировать работу разных участков, возможностей одной локальной системы становится недостаточно. В этом случае она может выступать как самостоятельный нижний элемент более крупной цеховой или распределенной структуры. Локальные си-

системы управления часто применяются для небольших функционально законченных объектов, где не требуется сложная иерархическая организация управления.

Цеховые системы

Цеховая АСУ ТП объединяет несколько технологических установок, машин или локальных систем, работающих в пределах одного цеха, производственного корпуса или относительно компактного участка предприятия. В отличие от локальной системы, она должна обеспечивать не только управление отдельным объектом, но и согласованную работу нескольких взаимосвязанных установок. Например, один участок может включать прием сырья, его обработку, промежуточное хранение, транспортирование и упаковку готовой продукции.

В составе цеховой системы могут использоваться несколько ПЛК, распределенные станции ввода-вывода, операторские панели, локальные рабочие места, промышленные коммутаторы, сервер архивирования и единая SCADA-система. Каждый контроллер отвечает за собственную установку или технологический узел, а верхний уровень объединяет информацию и обеспечивает координацию. Такое построение позволяет сохранить автономность локальных участков и одновременно предоставить оператору целостную картину работы всего цеха.

Одной из главных задач цеховой системы является координация технологических операций. Например, система управления участком обработки материала должна учитывать состояние подающего конвейера, загрузочного устройства, станка, системы охлаждения и отводящего транспортера. Запуск одного механизма может быть разрешен только после получения подтверждения от другого. Если оборудование одного участка остановлено, цеховая система должна ограничить или приостановить связанные операции, чтобы не

возникло накопления материала, переполнения бункеров или повреждения продукции.

Цеховой масштаб предъявляет более высокие требования к сетевой инфраструктуре. Необходимо обеспечить надежный обмен данными между контроллерами и верхним уровнем, разграничить информационные потоки, предусмотреть диагностику каналов и защиту от отказов. Для этого применяются промышленные сети Ethernet, резервированные линии связи, распределенные шкафы автоматики и специальные протоколы обмена данными. При этом основные контуры регулирования и защитные алгоритмы должны оставаться в локальных контроллерах, чтобы отказ цеховой SCADA не приводил к немедленной остановке всех установок.

Цеховая АСУ ТП также облегчает расширение производства. К ней можно подключить новую установку, дополнительный участок или резервный агрегат, если предусмотрены необходимые сетевые ресурсы, адресное пространство, мощности контроллеров и интерфейсы обмена. В результате система развивается по модульному принципу: отдельные локальные объекты могут модернизироваться самостоятельно, сохраняя взаимодействие с общей цеховой инфраструктурой.

Распределённые системы

Распределённые АСУ ТП охватывают территориально разнесенные технологические объекты, между которыми могут находиться значительные расстояния. Такие системы применяются на магистральных трубопроводах, в распределительных электрических сетях, водоканалах, газораспределительных комплексах, системах теплоснабжения, нефтедобывающих предприятиях и транспортной инфраструктуре. В подобных случаях единый объект управления фактически состоит из множества удаленных участков, насосных станций, подстанций, резервуаров, узлов учета и пунктов регулирования.

Особенностью распределенной системы является пространственное разделение средств измерения, локального управления и диспетчеризации. На каждом удаленном объекте устанавливаются датчики, исполнительные механизмы, ПЛК, удаленные терминалы или станции управления. Эти устройства выполняют локальные алгоритмы, контролируют состояние оборудования и передают данные в центральный диспетчерский пункт. Оператор на центральном уровне получает сведения сразу от множества удаленных объектов и может контролировать их работу через единую SCADA-систему.

Для передачи информации в распределенных системах используются промышленные сети, оптоволоконные линии, радиоканалы, сотовые сети, спутниковые каналы и другие средства телемеханики. Выбор канала зависит от расстояния, доступности инфраструктуры, требований к скорости обмена, надежности и защищенности. Например, для подстанций в пределах города может применяться оптоволоконная сеть, для удаленных насосных станций — радиоканал или мобильная связь, а для труднодоступных объектов — спутниковый канал.

В распределенной АСУ ТП особенно важны автономность и устойчивость локальных узлов. Потеря связи с центральным диспетчерским пунктом не должна приводить к неконтролируемому состоянию удаленного объекта. Поэтому ПЛК или удаленный терминал должен самостоятельно выполнять необходимые функции регулирования, блокировок и аварийной защиты. При нарушении связи объект может продолжить работу по последним действующим уставкам, перейти на резервный режим или выполнить контролируемый останов. После восстановления соединения накопленные данные должны быть переданы на диспетчерский уровень, если это предусмотрено архитектурой системы.

Распределенная структура позволяет управлять большим количеством территориально разнесенных объектов из одного или нескольких диспетчерских центров. Однако она значительно повышает требования к диагностике, резервированию, синхронизации времени и информационной безопасности. Необходимо контролировать состояние каждого канала связи, различать отказ оборудования и потерю коммуникации, защищать удаленные узлы от несанкционированного доступа и обеспечивать корректную работу системы при временной изоляции отдельных участков.

Особенности архитектуры

Масштаб АСУ ТП определяет не только количество оборудования, но и принципы его размещения. В локальной системе большая часть компонентов может находиться в одном шкафу или помещении. В цеховой системе оборудование распределяется по нескольким шкафам и участкам, а в распределенной системе отдельные станции управления могут быть разнесены на километры или десятки километров. Вследствие этого меняются требования к кабельным трассам, источникам питания, сетевому оборудованию и способам резервирования.

При увеличении масштаба возрастает роль иерархической структуры. Локальные контроллеры управляют конкретными технологическими узлами, цеховые системы координируют работу установок, а центральная диспетчерская получает сводную информацию и обеспечивает контроль удаленных объектов. При этом каждый уровень должен выполнять собственные функции и не зависеть полностью от вышестоящего. Такая организация позволяет ограничить последствия отказа: неисправность одного локального контроллера не должна выводить из строя весь цех, а потеря центральной связи не должна останавливать все удаленные технологические узлы.

Для территориально распределенных объектов большое значение имеет качество телеметрии. Оператору необходимо понимать, является ли полученное значение текущим или оно было передано некоторое время назад. Поэтому системы отображают время последнего обновления, состояние канала, качество сигнала и наличие связи с удаленным контроллером. Если информация устарела, SCADA должна явно сообщить об этом, чтобы оператор не принял неверное решение на основании данных, которые уже не отражают реальное состояние объекта.

Сравнение систем

Локальные, цеховые и распределенные АСУ ТП отличаются масштабом объекта, количеством узлов, протяженностью связей и уровнем централизации. Локальная система ориентирована на управление одной установкой и обычно имеет компактную структуру. Цеховая система объединяет несколько взаимосвязанных объектов в пределах производственного участка. Распределенная система соединяет удаленные технологические узлы, расположенные на значительной территории, и обеспечивает их диспетчерское наблюдение и координацию.

1.6. Требования к современным АСУ ТП

1.6.1. Требования надёжности и безопасности

Современная АСУ ТП должна обеспечивать непрерывность технологического процесса при единичных отказах отдельных технических средств, что достигается через резервирование критически важных компонентов и грамотное проектирование алгоритмов защиты, рассматриваемых подробно в главе 16 настоящего пособия.

Требование безопасности предполагает, что отказ любого компонента системы управления не должен приводить к опасному для персонала или оборудования состоянию технологического объекта. Данное требование реализуется через принцип «безопасного состояния при отказе», подразумевающий, что при потере питания, обрыве сигнальной цепи или ином отказе исполнительный механизм должен переходить в заранее определённое безопасное положение - например, регулирующий клапан аварийного сброса при потере управляющего сигнала должен открываться, а не закрываться.

1.6.2. Требования открытости и совместимости

Современная система должна строиться на основе открытых стандартов обмена данными, обеспечивающих совместимость оборудования различных производителей и возможность последующей модернизации без полной замены всей архитектуры. Этому требованию посвящена глава 13 настоящего пособия, рассматривающая промышленные сети и протоколы связи.

1.6.3. Требования масштабируемости цифрового расширения

Современная АСУ ТП должна допускать поэтапное подключение средств цифрового расширения - edge-обработки, аналитических платформ, систем предиктивной диагностики - без изменения базовой архитектуры локального управления. Это требование напрямую связано с принципом автономности нижних уровней системы, рассмотренным в пункте 1.2.2 настоящей главы, и будет детально раскрыто в главах 18 и 19.

Контрольные вопросы и задания

Уровень представления

- Назовите основные признаки, отличающие АСУ ТП от отдельного автоматического регулятора.

- Перечислите уровни пятиуровневой модели АСУ ТП в порядке возрастания времени реакции.

- Какие технические средства относятся к полемому уровню системы управления?

Уровень понимания

- Объясните, почему АСУ ТП называется «автоматизированной», а не «автоматической» системой.

- Раскройте сущность принципа автономности нижних уровней системы управления.

- В чём заключается различие между непрерывным и дискретным технологическим процессом с точки зрения построения алгоритма управления?

Уровень применения

- Проанализируйте предложенный вами технологический объект (например, компрессорную установку) и распределите его функции по трём группам: информационные, управляющие, вспомогательные.

- Обоснуйте, почему функцию аварийной защиты оборудования нецелесообразно возлагать на диспетчерский уровень системы.

- Определите, к какому классу по характеру технологического процесса относится линия расфасовки сыпучих материалов, и аргументируйте свой ответ.

Перенос опыта

- Предложите вариант модернизации существующей локальной системы управления насосной станцией с добавлением диспетчерского уровня, сохранив работоспособность нижних уровней при отказе верхнего.

- Спрогнозируйте последствия ошибочного объединения функций MES-системы и АСУ ТП в единой программе, установленной непосредственно на контроллере технологической установки.

Повный А. В., Гомельский государственный политехнический колледж

Сайт: <https://electricalschool.info/>

Канал в ТГ: <https://t.me/electricalschool>

Электронные учебные пособия: <https://electricalschool.info/e-textbooks.html>

Пособия по АСУ ТП и программированию ПЛК:
<https://electricalschool.info/e-textbooks.html#!digiseller/articles/156405>