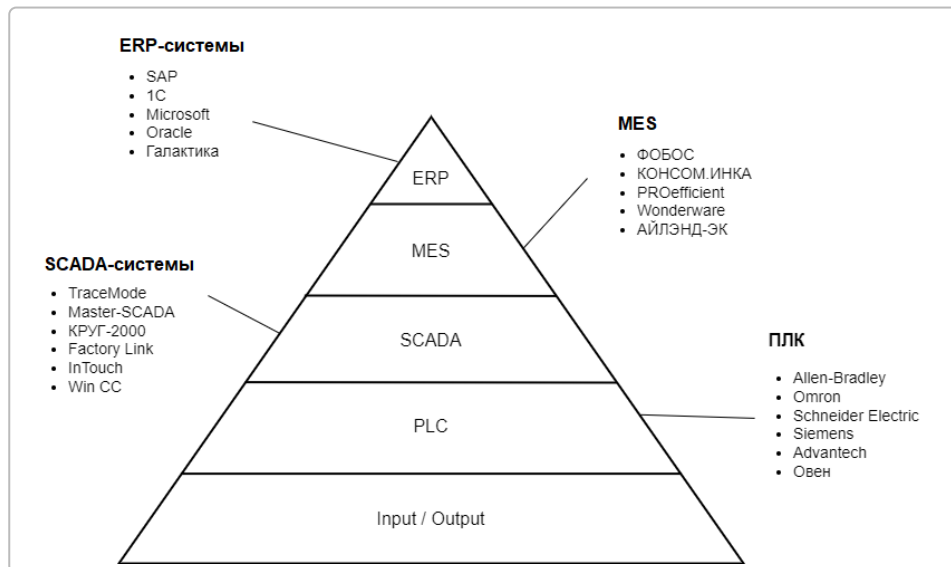


## КИПиА и АСУТП: Уровни автоматизации и ключевые компоненты



Классическая пирамида автоматизации (уровни от полевого I/O до ERP). **Контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА)** – это совокупность датчиков, приборов и исполнительных механизмов на поле, а **АСУ ТП** (автоматизированные системы управления технологическим процессом) – комплекс средств для автоматизации контроля и управления процессами. В промышленности выделяют **5 уровней автоматизации**: полевой уровень (оборудование I/O), уровень управления (контроллеры ПЛК), диспетчерский уровень (SCADA/HMI), уровень управления производством (MES) и уровень управления предприятием (ERP/MRP) <sup>1</sup>. Эти уровни взаимодействуют между собой, обеспечивая сбор данных с оборудования, автоматическое управление технологическими операциями, оперативный контроль и визуализацию, управление производством в реальном времени и интеграцию с бизнес-системами предприятия <sup>2</sup>.

### Полевой уровень: датчики и исполнительные устройства

**Полевой уровень** включает все **датчики** и **исполнительные механизмы**, установленные непосредственно на оборудовании или техпроцессах. Основная задача этого уровня – **сбор данных** о параметрах процесса и **низкоуровневое управление** механизмами <sup>3</sup>. На полевом уровне используются разнообразные приборы:

- **Датчики давления:** измеряют давление газа или жидкости (часто по принципу деформации мембраны с тензорезисторами либо пьезоэлектрическим эффекте). Они преобразуют давление в унифицированный электрический сигнал (например, ток 4–20 мА).
- **Датчики температуры:** включают термометрические сопротивления (RTD, где сопротивление изменяется с температурой) и термопары (генерируют термо-ЭДС). Позволяют измерять температуру среды, преобразуя её в электрический сигнал.

- **Датчики уровня:** контролируют уровень жидкостей или сыпучих материалов. Бывают поплавковые (дискретный сигнал положения), гидростатические (измеряют давление столба жидкости), ультразвуковые и радарные уровнемеры (испускают сигнал и измеряют время отражения), емкостные и др.
- **Датчики расхода:** измеряют расход жидкостей или газов. Примеры – дифференциальные (сужающие устройства и датчики перепада давления), турбинные расходомеры, электромагнитные (для проводящих жидкостей), вихревые и ультразвуковые расходомеры.
- **Исполнительные механизмы:** устройства, воздействующие на процесс по командам системы. Это **клапаны** (регулирующие потоки жидкостей/газов), **приводы и насосы, электродвигатели**, нагреватели и прочее оборудование, изменяющее параметры процесса. Исполнительные механизмы получают управляющие сигналы (дискретные – например, включить/выключить насос, или аналоговые – например, открыть клапан на 50%).

Датчики преобразуют физические величины в электрические **сигналы** и передают их на контроллеры. Исполнительные устройства получают сигналы от контроллеров и влияют на процесс (открывая клапаны, изменяя скорость двигателя и т.д.). Полевой уровень – фундамент автоматизации, обеспечивающий связь системы управления с реальным технологическим процессом.

## Типы сигналов в автоматизации

Для передачи данных от датчиков и команд к исполнительным устройствам используются различные **типы сигналов: аналоговые, дискретные и цифровые**. Их правильное понимание важно для проектирования систем КИПиА:

- **Аналоговые сигналы:** непрерывно изменяющиеся электрические сигналы, которые могут принимать любое значение в заданном диапазоне. В промышленности де-факто стандартом стал унифицированный **токовый сигнал 4–20 мА**, а также сигнал напряжения 0–10 В <sup>4</sup> <sup>5</sup>. Аналоговые датчики (например, давления, температуры) часто выдают сигнал 4–20 мА пропорционально измеряемой величине. Преимущества токового сигнала – низкая чувствительность к помехам и возможность диагностировать обрыв или короткое замыкание: ток <3,8 мА указывает на обрыв линии, а >21 мА – на перегрузку <sup>6</sup>. Напряженные сигналы (0–5 В, 0–10 В и др.) тоже применяются, но более чувствительны к наводкам.
- **Дискретные сигналы:** сигналы двухсостояния (двухуровневые), которые могут быть только **“включено” или “выключено”** (логический 1 или 0) <sup>7</sup>. Они передаются, как правило, как наличие или отсутствие напряжения. Примеры: сигнал от концевого выключателя (замкнут/разомкнут), от реле давления (превышен порог – да/нет), команда пуска/остановки двигателя. Обычно дискретные датчики и устройства работают на стандартизированных уровнях напряжения – например, 24 В DC для промышленной автоматики (лог.1 ~24 В, лог.0 ~0 В) или логика TTL (0–0,8 В = “0”, 2–5 В = “1” <sup>8</sup>). Дискретные сигналы обрабатываются модулями дискретного ввода/вывода контроллеров.
- **Цифровые сигналы:** в широком смысле – это **данные в цифровом (бинарном) формате**, передаваемые между устройствами. В контексте КИПиА под цифровыми сигналами понимают либо двоичные кодированные сигналы, либо обмен данными по цифровым протоколам. Например, **частотно-импульсные сигналы** (частота импульсов пропорциональна расходу – часто на выходе турбинных расходомеров) тоже относятся к цифровым, хотя и простейшим. Все **полевые шины и протоколы** (Modbus, Profibus и др.) фактически передают информацию в цифровом виде. Существуют **“умные” датчики**,

передающие показания сразу в цифровом формате – например, по интерфейсу **HART** (цифровой сигнал по току 4–20 мА <sup>6</sup>), по шине **Profibus PA, Modbus** и т.п. Цифровой сигнал позволяет передавать не только измеренное значение, но и служебную информацию (например, диагностику датчика) без потерь точности, однако требует совместимости по протоколу между устройствами.

Таким образом, **аналоговые** сигналы обеспечивают передачу непрерывных значений процесса, **дискретные** – фиксируют факты (события, состояния), а **цифровые** – позволяют обмениваться сложной информацией в кодированном виде. В современной АСУТП все три вида сигналов широко применяются: контроллеры имеют модули аналогового и дискретного ввода-вывода, а также порты для цифровых промышленных сетей.

## Уровень управления: ПЛК и контроллеры

**Уровень управления** предназначен для автоматического выполнения логики управления технологическим процессом. На этом уровне работают **программируемые логические контроллеры (ПЛК)** – специализированные промышленные компьютеры, считывающие сигналы с датчиков и формирующие управляющие воздействия на оборудование. **ПЛК** обеспечивают *непрерывную связь* с полевыми устройствами и выполняют запрограммированные алгоритмы управления в реальном времени <sup>9</sup>. Ключевые аспекты уровня управления:

- **Функции контроллеров:** ПЛК циклически опрашивают датчики, контролируют параметры процесса (температуру, давление, уровень и т.д.) и управляют исполнительными механизмами согласно заданному алгоритму <sup>9</sup>. Например, поддерживают температуру путем открытия/закрытия клапана подачи пара, запускают насосы при снижении уровня ниже заданного, координируют работу конвейеров и роботов и т.п. Контроллеры также выполняют предварительную обработку данных, защитные блокировки, аварийные отключения, сбор статистики. Полученные данные ПЛК передают на верхние уровни (SCADA/MES) для мониторинга и анализа.
- **Типы ПЛК:** Контроллеры бывают различные по производительности и конструкции. *Компактные ПЛК* представляют моноблочные устройства с фиксированным набором I/O, подходящие для локальных задач. *Модульные ПЛК* состоят из базы и наборов модулей ввода-вывода и коммуникационных модулей, легко расширяются – это наиболее распространено на средних и крупных объектах. *Распределенные и встраиваемые контроллеры* могут объединяться в сети. Существуют *специализированные ПЛК* – например, **безопасные контроллеры** (с повышенной надежностью для SIL-систем), контроллеры с защищенным исполнением (взрывозащищенные) и др. По сути, на этом уровне могут применяться и **DCS-контроллеры** (модули распределенных систем управления) – функционально они близки к ПЛК, но обычно входят в состав единой DCS-системы.
- **Программирование и логика:** ПЛК программируются с использованием стандарта **IEC 61131-3**, который определяет несколько языков программирования контроллеров. На практике наиболее популярны *графические языки*: **Ladder Diagram (LD)** – релейно-контактные схемы (логика в виде “электрической” лестницы), **Function Block Diagram (FBD)** – функциональные блоки, а также **Sequential Function Chart (SFC)** для описания последовательных операций. Для сложных вычислений применяются *текстовые языки*: **Structured Text (ST)** (структурированный текст, похож на Pascal/C) и ранее использовавшийся Instruction List (IL). Программист может реализовать алгоритмы автоматизации – ПИД-регуляторы, логические условия, таймеры, счетчики, математические расчеты – выбрав удобный язык или сочетая их. Грамотно написанная программа ПЛК обеспечивает устойчивое и безопасное управление процессом без участия человека.

- **Резервирование контроллеров:** В критически важных приложениях (энергетика, химия, металлургия) часто используется **отказоустойчивая архитектура** контроллеров. Она включает дублирование важных компонентов: устанавливаются **два идентичных ПЛК** (основной и резервный) в режиме горячего резерва, **двойные блоки питания**, **резервированные модули ввода-вывода**, а также **две независимые сети связи** для обмена с контроллерами <sup>10</sup>. В нормальной работе основной контроллер управляет процессом, а резервный синхронно получает от него данные; при отказе основного – резервный автоматически берет управление на себя практически без перерыва. Такое аппаратное резервирование повышает **безотказность** системы управления. Кроме полного дублирования (1oo2 архитектура), может применяться частичное резервирование (например, два ЦПУ на общую периферию). Цель – избежать остановки процесса при выходе из строя контроллера или его узлов.

Таким образом, уровень управления основан на ПЛК и контроллерах, которые выполняют **автоматическое регулирование** и **логику** процессов. Надежность этого уровня критически важна – от него зависит непрерывность и безопасность производства, поэтому помимо функциональности уделяется внимание **резервированию** и защищенности контроллеров.

## Промышленные сети и интерфейсы

Современные системы автоматизации используют разнообразные **промышленные сети** для обмена данными между устройствами полевого, контроллерного и верхнего уровней. Промышленные сети обеспечивают коммуникацию датчиков с ПЛК, ПЛК между собой, ПЛК с SCADA/DCS и далее вплоть до MES. Наиболее распространены такие сети и протоколы:

- **RS-485 (Serial)** – электрический стандарт физического уровня, широко применяемый для последовательного обмена данными. RS-485 поддерживает шинную топологию (линия из витой пары), к которой можно подключить множество узлов (до 32 устройств на сегмент длиной до ~1200 м) <sup>11</sup>. Линия дифференциальная (два провода А и В), что обеспечивает помехоустойчивость. RS-485 работает в полу-дуплексном режиме (передача попеременно в обе стороны). Это физическая основа для многих **протоколов** низкого уровня – прежде всего **Modbus RTU**, а также Profibus-DP, DH-485 и др. Достоинства RS-485 – простота, дешевизна, дальность связи; ограничение – невысокая скорость (до 10–12 Мбит/с на коротких отрезках, на длинных линиях обычно 19,2–115 кбит/с).
- **Протокол Modbus (RTU/TCP):** один из самых простых и популярных **протоколов обмена** данными в АСУТП. Работает по архитектуре *ведущий-ведомый* (master-slave) – обычно ПЛК или компьютер опрашивает несколько подчиненных устройств (например, датчики или модули I/O). **Modbus RTU** функционирует поверх RS-485 (или RS-232) и передает сообщения в бинарном формате <sup>12</sup>. Устройствам назначаются адреса (1–247) и мастер по очереди посылает им запросы (например, прочитать регистры, установить выходы), на которые ведомые отвечают. Modbus RTU прост в реализации и поэтому встроен во множество приборов (преобразователи, частотники, контроллеры и пр.). **Modbus TCP** – вариант этого же протокола, работающий поверх TCP/IP (Ethernet). Он использует ту же логику команд, но сообщения передаются по сети Ethernet (порт 502) без ограничения по адресам (адресация идет по IP-адресам устройств). Modbus TCP позволяет интегрировать оборудование напрямую в локальную сеть предприятия или SCADA-систему без преобразователей.
- **Profibus:** класс семейства **Fieldbus** – цифровых сетей для полевых устройств. **Profibus-DP** (Decentralized Periphery) – наиболее распространенный вариант для связи контроллеров с децентрализованными I/O, приводами, измерительными приборами. Физически Profibus DP использует интерфейс **RS-485** (линия из экранированной витой пары) с коммуникацией

до **12 Мбит/с** и поддержкой до 32 устройств на сегменте <sup>13</sup>. Сеть обычно работает по схеме мастер/слейв либо мультимастер. Profibus обладает строго регламентированным протоколом канального уровня (FDL) и циклически передает данные ввода-вывода с гарантированным временем обновления. **Profibus PA** – вариант для подключения полевых датчиков в процессных (непрерывных) производствах, использует другой физический уровень (IEC 61158-2, двухпроводная шина с питанием и манчестерским кодированием) и скорость 31,25 кбит/с, пригоден для взрывоопасных зон <sup>14</sup> <sup>15</sup>. Profibus был одним из самых массовых полевых шин в 1990–2000-х годах, особенно в системах Siemens; ныне постепенно уступает место Industrial Ethernet сетям, но по-прежнему очень распространен.

- **PROFINET**: современный промышленный **Ethernet-протокол**, пришедший на смену Profibus. Разработан организацией Profibus International (ведущая роль Siemens). Profinet базируется на стандарте Ethernet и TCP/IP, однако для обеспечения детерминизма и скорости использует специальные методы (режимы Real-Time и Isochronous RT, приоритет трафика, возможность работы без TCP/IP для циклических данных). **PROFINET IO** позволяет контроллерам обмениваться данными с распределенными I/O модулями и устройствами по Ethernet в режиме реального времени (циклы от 1 мс и меньше). Топология – звезда или дерево через коммутаторы, поддерживается ring с резервированием (протокол MRP). Profinet легко интегрируется с корпоративными сетями благодаря совместимости с обычным Ethernet на верхнем уровне <sup>15</sup>. Он также поддерживает профили устройств, аналогичные профилям Profibus. Преимущества Profinet – высокая пропускная способность, гибкость (одна сеть для устройств разных типов), объединение ИТ и ОТ (операционных технологий) в единую сеть. Сегодня PROFINET – один из ведущих промышленных протоколов, особенно в Европе; многие ПЛК и устройства “из коробки” имеют порт Profinet.
- **EtherNet/IP**: еще один популярный стандарт промышленного Ethernet, продвигаемый ODVA (Rockwell Automation, Cisco и др.). Название может путать (не путать с TCP/IP) – здесь **IP** означает *Industrial Protocol*, а суть – перенос на Ethernet хорошо зарекомендовавшего себя **CIP (Common Industrial Protocol)**, применявшегося в сетях DeviceNet и ControlNet. EtherNet/IP появился в 2001 году и стал одним из самых распространенных промышленных Ethernet-решений <sup>16</sup>. Он обеспечивает унифицированную объектно-ориентированную модель для устройств (профили), передачу как циклических I/O данных, так и сообщений настроек/диагностики. Использует стандартные технологии Ethernet (TCP/UDP/IP) – например, TCP/44818 для одновременной конфигурации и CIP-обмен по UDP/2222 для ввода-вывода. Протокол EtherNet/IP поддерживают сотни производителей, что дает возможность строить единое коммуникационное пространство на предприятии <sup>16</sup>. Плюсы: совместимость с обычным сетевым оборудованием, высокая скорость (100 Мбит/с и выше), большое адресное пространство, одновременная передача данных управления, информации и настройка устройств в одной сети. EtherNet/IP широко применяется в Северной Америке (стандарт фактически для Rockwell/Allen-Bradley PLC), а также во всем мире для интеграции оборудования различных брендов.
- **Другие сети и протоколы**: Существует множество других промышленных сетевых решений. Например, **CAN/CANopen** и DeviceNet – сети на основе CAN-шины для связи контроллеров и устройств, часто в машинах и станках. **AS-Interface** – простая двухпроводная сеть для датчиков/исполнителей (до 31 узла) на низком уровне. **Foundation Fieldbus (FF H1)** – цифровая шина для полевых приборов в процессных установках (как альтернатива 4-20 мА+HART), обеспечивает распределенное управление на уровне полевых устройств. **HART** – протокол наложенный на аналоговый сигнал 4–20 мА, дающий цифровой канал для конфигурации и диагностики приборов <sup>6</sup>. **BACnet, KNX** – сети для диспетчеризации зданий. **MQTT, OPC UA** – протоколы более высокого уровня, активно используемые для обмена данными с верхними уровнями и облаком (особенно в концепциях IIoT и Industry 4.0). Каждый протокол и сеть имеет свою нишу применения,

скорость, топологию и уровень открытости. Важная задача инженера АСУТП – выбрать подходящую коммуникационную среду, обеспечив совместимость устройств и надежность передачи данных.

## Резервирование сетей и серверов

**Надежность** – ключевое требование к промышленным системам управления. Помимо резервирования контроллеров, о котором сказано выше, применяются методы резервирования **сетевой инфраструктуры и серверов** верхнего уровня, чтобы исключить единые точки отказа. Основные подходы к резервированию:

- **Резервирование сети:** Для сетевых соединений часто используются **кольцевые топологии** с протоколами восстановления связности. Например, стандартный для промышленного Ethernet протокол **MRP (Media Redundancy Protocol)** создает кольцо из коммутаторов: один из них активен как менеджер и при обрыве сегмента за миллисекунды переводит трафик на обходной путь. Протоколы на основе **RSTP (Rapid Spanning Tree)** также применяются для резервирования, хотя они медленнее (время восстановления сотни мс). Популярность MRP и его разновидностей подтверждает, что отказоустойчивость сети Ethernet стала нормой <sup>17</sup> – они обеспечивают восстановление связи за определенное время, зависящее от размера и топологии сети. Для больших систем возможна многоуровневая иерархия кольцевых сегментов с мостовыми узлами.
- **“Бесшовное” резервирование (0 ms):** В случаях, когда даже кратковременное нарушение связи недопустимо (например, синхронное управление электродвигателями, высокоскоростная автоматика), применяются протоколы **PRP** и **HSR** (стандарт IEC 62439-3). **PRP (Parallel Redundancy Protocol)** требует **двух полностью независимых сетей** – каждый узел сети имеет два порта, и все пакеты отправляются дублированно по двум каналам одновременно <sup>18</sup>. В нормальной ситуации оба пакета доходят, а получатель принимает первый и отбрасывает дубликат; если один маршрут разорван, пакет все равно дойдет по второму без задержки. Таким образом достигается нулевое время восстановления при отказе сети или узла. **HSR (High-availability Seamless Redundancy)** – вариант для кольцевой топологии: узлы соединены друг с другом в кольцо и пересылают фреймы по принципу маркерного кольца, тоже дублируя пакеты в оба направления. PRP/HSR требуют поддержки на уровне устройств (в контроллерах устанавливаются двойные сетевые интерфейсы или “редбоксы” – шлюзы), зато дают непрерывную связь без потерь и переключений при любом одиночном отказе.
- **Проприетарные решения (кольцевые сети):** Ряд производителей оборудования имеет свои реализации резервирования. Например, **Turbo Ring** от Мухоморова – это фирменный протокол кольцевого резервирования на коммутаторах Мухоморова, обеспечивающий **минимальное время восстановления сети** при разрыве связи <sup>19</sup>. Аналогично, **HiPER-Ring** у Hirschmann, **DLR (Device Level Ring)** у Rockwell/ODVA и другие. Эти решения, как правило, оптимизированы для быстрого восстановления ( $\leq 20$  мс на кольцо) и удобной настройки в однородной среде, но могут быть несовместимы между разными вендорами. Выбор конкретного протокола часто зависит от экосистемы оборудования на объекте (Profinet-коммутаторы поддерживают MRP, в энергетике популярен PRP, в инфраструктурных решениях – разнообразные Rapid Spanning Tree или Proprietary Ring и т.д.).
- **Резервирование серверов:** На уровне **SCADA/DCS-систем** и **MES** также обеспечивается отказоустойчивость. Обычно критичные серверы (сервер сбора данных и алармов, сервер HMI, исторический архив) устанавливаются в **резервируемом парном исполнении** (Primary/Standby). Основной сервер активно работает, а резервный синхронно получает от него обновления базы данных и состояния; при сбое основного, резервный автоматически

берет на себя работу (конфигурация *Hot Standby* или *Warm Standby* в зависимости от типа системы). Например, SCADA-система может иметь два сервера на одной сети – клиенты (операторские станции) подключаются к основному, а при его недоступности переключаются на запасной. Точно так же часто дублируются серверы баз данных (кластеризация SQL-серверов) и приложения MES. **Резервирование серверов и данных** гарантирует, что отказ вычислительной техники не приведет к потере контроля или ценнейших исторических данных.

- **Двойные шины и каналы:** Во многих системах применяют принцип двух **независимых каналов связи** для важных узлов. Например, контроллер может иметь два сетевых интерфейса, подключенных к разным коммутаторам и сегментам сети (реализация *ring coupling* или *star redundancy*). Протоколы вроде **LACP (агрегация каналов)** могут быть использованы для увеличения пропускной способности и устойчивости к отказу одного линка. В системах противоаварийной защиты (PAS/ESD) иногда делают дублирование не только контроллеров, но и полностью независимых цепочек: два параллельных комплекта датчиков, две независимых контроллера, голосующее устройство на выходе (архитектура 2oo3). Всё это повышает **живучесть** АСУТП.

Правильное резервирование на всех уровнях – от датчиков до сети и серверов – обеспечивает требуемую **безотказность** и **безопасность** технологического процесса, позволяя системе выдерживать отказ отдельных компонентов без прекращения контроля и управления.

## SCADA и DCS: диспетчеризация и управление процессом

**SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** и **DCS (Distributed Control System)** – два класса систем верхнего уровня, предназначенных для мониторинга и оперативного управления технологическими процессами. Оба типа решают схожие задачи (отображение данных операторам, сбор и хранение информации, отправка команд на оборудование), но исторически отличаются архитектурой и сферой применения. Рассмотрим их особенности и различия:

- **SCADA-системы:** предназначены для **диспетчерского управления и сбора данных** с разбросанных объектов. SCADA обычно имеет **централизованную архитектуру** – множество удаленных контроллеров (ПЛК, RTU) передают данные на единый или дублированный сервер/станцию оператора <sup>20</sup>. SCADA оптимальна для **географически распределенных процессов**: например, сети трубопроводов, нефтяные скважины, объекты энергетики, системы водоснабжения, где десятки и сотни удаленных узлов должны контролироваться из единого центра <sup>21</sup>. SCADA обеспечивает **сбор, обработку и визуализацию** данных в реальном времени: операторы на экране HMI видят технологические параметры, тренды, получают аварийные сигналы и могут посылать команды. SCADA-платформы (Wonderware, WinCC, GE iFix, Ignition и др.) в основном **привязаны к ПО**: то есть ядро системы – программное обеспечение, которое можно установить на стандартные серверы/ПК. За счет этого SCADA-системы довольно **гибкие и масштабируемые** – относительно легко добавить новые устройства, точки данных, модули, интегрировать с другими программными системами. SCADA поддерживает множество коммуникационных **протоколов** (Modbus, OPC, DNP3, IEC-104, BACnet, и т.д.), что позволяет работать с оборудованием разных производителей. Оператор в SCADA играет ключевую роль: система предоставляет полную информацию, но решения (нажатия кнопок, изменение уставок) часто принимает человек, особенно в режиме диспетчеризации.
- **DCS-системы:** ориентированы на **управление технологическими процессами в пределах одного предприятия или установки** (завод, установка непрерывного производства и т.п.) <sup>21</sup>. DCS изначально разрабатывались как *“комплексное решение”* от

одного производителя, включающее всё – полевые контроллеры, операторские станции, сеть и базовое ПО – в единой системе. **Распределенная архитектура** DCS подразумевает, что множество локальных контроллеров (модули управления, часто соединенные по своей шине) совместно выполняют управление, координируясь между собой без явного центра <sup>20</sup>. Операторские интерфейсы (HMI) в DCS, как правило, *интегрированы* и тесно связаны с контроллерами: зачастую графические станции и контроллеры – от одного производителя, образуют единую платформу <sup>22</sup>. DCS отлично подходят для **непрерывных или сложных процессов** на одном объекте – например, химические реакторы, нефтепереработка, энергоблоки. Они обеспечивают **жесткий детерминизм и надежность**: связь между контроллерами и операторскими станциями обычно происходит по высоконадежным сетям (собственные шины, Industrial Ethernet с резервированием). DCS-системы имеют много встроенных функций для *автономного контроля* – библиотека готовых типовых блоков (регуляторы, клапаны, моторы), развитые алгоритмы автоматизации, заранее предусмотренные режимы. Это позволяет минимизировать влияние человеческого фактора: DCS чаще сама поддерживает процесс внутри заданных рамок, оператор лишь контролирует.

- **Отличия SCADA vs DCS:** Несмотря на сближение технологий, имеются **принципиальные отличия**. **Область применения:** SCADA – для **распределенных объектов**, DCS – для **локальных больших процессов** <sup>21</sup>. **Архитектура:** SCADA – **централизованная** (данные стекутся на сервер), DCS – **децентрализованная** (умные узлы сами обмениваются данными) <sup>20</sup>. **Открытость:** SCADA-системы более **открытые и модульные** – легко добавить оборудование, поменять часть ПО, использовать разные протоколы; DCS более **замкнутые** – их сложнее расширить посторонними компонентами, обычно привязаны к вендору <sup>23</sup>. **Реагирование:** DCS предоставляют более **быструю реакцию в реальном времени** (минимальные задержки между датчиком и исполнительным устройством) – критично для непрерывных процессов, SCADA же часто работает с небольшими задержками и ориентирована на удобство операторов и интеграцию. **Роль человека:** SCADA предполагает активное участие оператора (он “надзирает” и при необходимости вмешивается), DCS – более автономна, оператор наблюдает за уже автоматическим контролем и вмешивается реже. **Пример:** управление городской электросетью – задача для SCADA (тысячи точек, нужны распределенные RTU), а управление технологической линией на заводе – для DCS (всё оборудование на одной площадке, требуются синхронные действия).
- **Современные тенденции:** Границы между SCADA и DCS несколько размываются. SCADA-платформы становятся все более мощными, поддерживают *горячее резервирование* серверов, большие базы данных и даже сложные управляющие алгоритмы – что раньше было вотчиной DCS. С другой стороны, **DCS** системы используют стандартные технологии (часто по сути тот же промышленный Ethernet и OPC-протоколы), поддерживают подключение сторонних устройств, открываются для интеграции с IT-системами. Появились понятия **PAS (Process Automation System)** или hybrid DCS, объединяющие лучшее от обоих подходов. Тем не менее, при выборе архитектуры следует учитывать вышеописанные особенности: **SCADA** оптимальна там, где важны *гибкость, открытость и широкая география*, а **DCS** там, где важны *жесткий контроль в реальном времени и единая надежная система*.

## Верхний уровень: MES-системы и интеграция с ERP

**MES (Manufacturing Execution System)** – системы управления производственными операциями, и **ERP (Enterprise Resource Planning)** – системы планирования ресурсов предприятия, образуют верхние уровни пирамиды автоматизации (уровни 3 и 4 по модели ISA-95). Они обеспечивают



связь между цеховой автоматикой (АСУТП) и бизнес-уровнем компании, позволяя эффективно планировать и контролировать производство в увязке с экономическими показателями.

- **MES: управление производством в реальном времени.** MES-система располагается над уровнем SCADA/DCS и отвечает за *оперативное управление производственными процессами*. Основная задача MES – **планировать, оптимизировать, контролировать и документировать производство** на тактическом уровне <sup>24</sup>. Функционально MES охватывает множество направлений: **диспетчеризация производства** (управление выполнением сменных заданий, очередностью партий), **оперативное планирование** (краткосрочное расписание с учетом текущих условий), **учет и распределение ресурсов** (мониторинг оборудования, материалов, персонала) <sup>25</sup>, **управление качеством** (отслеживание параметров и результатов контроля качества), **управление техническим обслуживанием** (планирование и учет ТОиР), **прослеживаемость** выпуска (tracking & tracing по партиям и серийным номерам), **анализ эффективности** (например, расчет OEE – Overall Equipment Efficiency) и др. MES действует в горизонте от минут до дней – обеспечивает *тактические решения*: например, перераспределить загрузку станков при неисправности одного, переназначить оператора на другую линию, скорректировать план выпуска на смену в случае задержки сырья и т.п. По сути, MES является “мостом” между цеховой автоматикой и ERP: она получает от нижних уровней (SCADA/PLC) данные о фактическом ходе процесса (показатели, простои, браке), агрегирует их и предоставляет информацию для принятия решений, а от ERP – планы и распоряжения, которые декомпозирует до уровня конкретных заданий для оборудования и сменных заданий персоналу <sup>26</sup>. Современные MES часто представляют собой программные платформы с модульной структурой, работающие поверх СУБД (MS SQL, Oracle, PostgreSQL) и интегрирующиеся с АСУТП через OPC, API или прямые подключения к контроллерам.
- **ERP: планирование и учет на уровне предприятия.** ERP-система функционирует на верхнем, **стратегическом уровне управления предприятием** <sup>27</sup>. Она объединяет данные и процессы различных служб – производство, закупки, склады, сбыт, логистику, финансы, персонал – в едином информационном пространстве. В контексте автоматизации производства ERP формирует **производственные планы** на основе полученных заказов и прогнозов (планирование MPS/MRP), определяет потребность в материалах, выдает сменно-суточные задания (через MES) и затем принимает от MES данные о выполнении <sup>28</sup>. ERP также обрабатывает финансово-экономические аспекты: себестоимость выпуска, учет трудозатрат, движение средств. Примеры ERP – SAP S/4HANA, Oracle E-Business Suite, Microsoft Dynamics, а на постсоветском пространстве – 1C:ERP, Галактика и др. ERP-системы определяют *стратегию и агрегированные показатели*: месячные планы, планы по прибыли, загрузке мощностей, управляют цепочками поставок. Согласно ISA-95/IEC 62264, ERP и MES находятся на разных уровнях, но должны быть интегрированы для **сквозного управления** – стандарт предусматривает модели данных и объекты для обмена между ERP и MES <sup>28</sup>. Например, ERP передает MES производственный заказ и необходимую спецификацию, MES возвращает ERP данные о выпуске продукции, затратах и отклонениях. Такая интеграция все чаще реализуется посредством сервис-ориентированных решений, API или через промежуточные базы данных.
- **Базы данных и Historian:** На верхних уровнях автоматизации широко применяются **реляционные СУБД** (Microsoft SQL Server, Oracle, PostgreSQL и др.) для хранения больших объемов технологических и производственных данных. Специализированные **Historian**-системы (OSIsoft PI, Wonderware Historian, GE Proficy) оптимизированы для хранения **временных рядов** (измерений во времени с миллисекундным шагом) – они тоже обычно работают поверх SQL-движков или собственных бинарных хранилищ. MES-системы используют базы данных для хранения технологических параметров, рецептов,

результатов партий, данных о качестве, событиях и т.д. ERP – для хранения транзакционных данных (заказы, накладные, планы). Связка SCADA/MES с СУБД позволяет реализовать **отчётность, аналитику и BI** (business intelligence) – строить отчеты о производительности, аналитику простоев, анализ качества и т.п. Например, SCADA может записывать показания ключевых датчиков каждые секунды в SQL-базу (trend logs), MES – фиксировать время начала/окончания операций, ERP – сравнивать плановый и фактический выпуск. Благодаря общим базам данных обеспечивается **прозрачность** производства для всех уровней: от оператора на панели до директора предприятия.

- **MES-ERP интеграция и ISA-95:** Правильное распределение функционала между системами – залог успешной интеграции. Согласно **ISA-95** (международный стандарт интеграции промышленной автоматизации и управления предприятием), **ERP охватывает уровни планирования (уровень 4)**, а **MES – уровень управления операциями (уровень 3)** <sup>27</sup>. MES принимает от ERP производственное расписание (например, на неделю), детализирует его по сменам и часам, учитывая реальные ограничения (наличие материалов, состояние оборудования) <sup>29</sup> <sup>26</sup>. Затем MES отслеживает выполнение: сколько произведено, какого качества, сколько времени заняло, простои, причины отклонений. Эти результаты поднимаются в ERP для учета и, возможно, корректировки планов. Стандарт ISA-95 описывает объекты обмена – производственные заказы, партии, записи о производственной партии, оборудовании, материалах – чтобы облегчить интеграцию различных систем <sup>28</sup>. Благодаря этому стыку ERP-MES достигается **сквозная информационная среда**: управление от бизнес-задач до датчиков осуществляется без разрывов.

В итоге верхний уровень автоматизации, представленный MES и ERP, обеспечивает **прозрачное управление производством и ресурсами**. MES оперативно связывает цех с офисом, позволяя гибко реагировать на изменения (приказы, внеплановые работы), а ERP дает глобальную оптимизацию и эффективность бизнеса. Совместно с системами предиктивной аналитики и BI это формирует основу концепций **“Цифрового производства”** и **Industry 4.0**, где решения принимаются на основе данных в реальном времени, поступающих снизу вверх по всей пирамиде автоматизации.

## Системы предиктивной диагностики и обслуживания

**Предиктивная диагностика** (predictive diagnostics) – это современный подход к техническому обслуживанию, основанный на *прогнозировании* состояния оборудования. Цель – **выявить зарождающиеся неисправности на ранней стадии** и предотвратить аварии или простои за счет заблаговременных мер <sup>30</sup>. В отличие от реактивного (по факту поломки) или регламентного обслуживания (по плану времени), предиктивное обслуживание использует данные и аналитику, чтобы предсказать, *когда* и *где* может произойти отказ. Ключевые положения и примеры:

- **Принципы предиктивного анализа:** Предиктивная диагностика опирается на сбор *больших объемов данных* с оборудования в процессе его работы и применение методов анализа (статистических, модельных, машинного обучения), чтобы обнаруживать **аномалии и отклонения** от нормального поведения <sup>31</sup>. Используются показания датчиков (вибрация, температура, ток, давление, расход и др.), регистрируются события (срабатывания защит, увеличенное время цикла) – и все это анализируется автоматизированно. **Возможные неисправности обнаруживаются заранее**, и система выдает предупреждение или рекомендацию по обслуживанию, прежде чем случится отказ <sup>31</sup>. Например, если вибрация подшипника насоса постепенно растет и выходит за допустимые тренды, система сигнализирует о начинающемся износе – можно запланировать замену подшипника в удобное время, избежав аварийного разрушения.

Таким образом, достигается **минимизация незапланированных простоев** и предотвращение серьезных повреждений оборудования.

- **Методы и датчики предиктивной диагностики:** К классическим методам относятся: **вибрационный мониторинг** – измерение вибраций вращающихся машин (анализ спектра вибраций позволяет выявлять разбалансировку, разрушающиеся подшипники, проблемные редукторы); **термография** – контроль температуры узлов (инфракрасные камеры или датчики температуры показывают перегрев подшипников, электрических соединений и т.п.); **анализ масел** – регулярный лабораторный анализ смазочного масла на наличие продуктов износа; **ультразвуковой контроль** – выявление утечек газа/воздуха или электрических разрядов по высокочастотному шуму; **мониторинг электрооборудования** – контроль токов/напряжений двигателей (метод сигнатур тока может указать на проблемы в механике). Современные системы дополнены сетью недорогих датчиков и **Industrial IoT**-устройств, передающих данные беспроводно. Также применяются **онлайн-модели** – цифровые двойники оборудования, которые сравнивают текущие показатели с вычисленной нормой. За счет развития технологий, предиктивное обслуживание стало доступнее: стоимость датчиков снижается, а мощность вычислений растет <sup>32</sup>. Например, многие новые электродвигатели и насосы поставляются уже с встроенными вибродатчиками и модулями передачи данных.
- **Примеры применения:** Предиктивная аналитика находит применение во многих отраслях. В энергетике – мониторинг турбин, генераторов, трансформаторов (предупреждение вибрационных дефектов лопаток, частичных разрядов в изоляции и т.п.). В нефтегазе – диагностика насосов, компрессоров, буровых установок (выявление износа клапанов, поломки опор). В производстве – контроль станков (вибрация шпинделей, состояния режущего инструмента), конвейеров (температура подшипников), печей (анализ температуры и пламени для выявления неполадок). На железнодорожном транспорте – системы мониторинга букс колесных пар по температуре, диагностика двигателей локомотивов по сигнатуре тока. Современные **ПАКи (программно-аппаратные комплексы) предиктивной диагностики** часто собирают данные в реальном времени и используют алгоритмы **machine learning**: например, аномалия детектируется нейросетью на основе отклонения многомерного профиля вибросигнала от “эталонного” для данного оборудования <sup>33</sup>. Компания **GE** известна решениями *SmartSignal*, которые на основе моделей отслеживают множество параметров турбин и выдают прогнозы отказов за недели вперед.
- **Преимущества:** Внедрение предиктивной системы позволяет перейти от парадигмы “ремонт после поломки” к **прогнозному обслуживанию**, что резко сокращает **потери от простоев и затраты на аварийные ремонты**. По разным оценкам, грамотное использование предиктивной аналитики снижает незапланированные простои на 30-50%, а расходы на обслуживание – на 10-30%. Кроме того, повышается **безопасность** – меньше вероятность внезапного аварийного разрушения, которое могло бы привести к авариям и травмам. Предиктивные системы нередко окупаются за счет предотвращения всего 1–2 крупных аварий. Они также дают ценную информацию производству – например, где “узкие места” по надежности, какое оборудование требует модернизации. В итоге предиктивная диагностика вписывается в концепцию **ТОиР по состоянию (Condition Based Maintenance)** и является важной составляющей **умных производств**. Как отмечалось, основное назначение таких систем – *выявлять отклонения* в работе оборудования на ранних этапах и рекомендовать действия, **минимизируя или полностью исключая нежелательные последствия** поломок <sup>30</sup>.

В заключение, системы предиктивной диагностики дополняют классическую пирамиду автоматизации, работая параллельно с MES/ERP и используя данные АСУТП. Они демонстрируют, как глубокий анализ данных и **искусственный интеллект** в промышленности поднимают эффективность на новый уровень – от простого автоматического управления к *прогнозирующему*,

самоподстраивающемся производстве. Инженерам КИПиА важно понимать основы предиктивной аналитики, чтобы успешно внедрять и эксплуатировать такие системы, повышая надежность и экономичность технологических процессов.

**Источник данных:** Приведенная информация основана на материалах из открытых источников и отраслевых стандартов, включая описание многоуровневой структуры АСУТП <sup>1</sup>, особенности полевого уровня и сигналов <sup>3 5 7</sup>, принципы работы промышленных сетей Modbus, Profibus, Profinet, EtherNet/IP <sup>12 13 15 16</sup>, подходы к резервированию оборудования и сетей <sup>10 18</sup>, сравнительный анализ SCADA и DCS <sup>21 23</sup>, а также обзоры по MES/ERP интеграции <sup>25 34</sup> и предиктивному обслуживанию <sup>31 30</sup>. Эти сведения помогут инженерам и студентам получить целостное представление обо **всех уровнях автоматизации** – от датчика до корпоративной системы – и об их ключевых технологиях и методах.

---

<sup>1 3 9</sup> Какие аспекты затронет автоматизация предприятия, какие системы можно использовать и как нивелировать возможные риски

<https://www.simbirsoft.com/blog/5-urovney-avtomatizatsii-v-promyshlennosti-chto-uchest-pri-razrabotke-po/>

<sup>2</sup> Автоматизация технологических процессов и производств

<https://eduugmk.com/directions/vo/bakalavriat/avtomatizatsiya-tehnologicheskikh-protseessov-i-proizvodstv-bac/15-03-04-avtomatizatsiya-tehnologicheskikh-protseessov-i-proizvodstv/>

<sup>4</sup> Аналоговый ввод/вывод ПЛК - Control Engineering Russia

<https://controleng.ru/apparatnye-sredstva/analogovyy-vvod-vyvod-plc/>

<sup>5 6</sup> Таблицы унифицированных сигналов КИПиА: 4-20мА, 0-10В, термопары, схемы

<https://inner.su/articles/tablitzy-unifitsirovannykh-signalov-kipia/>

<sup>7 8</sup> Дискретные сигналы. Возможные состояния. Измеримые параметры.

<https://studfile.net/preview/8626074/>

<sup>10</sup> резервирование и дуальная архитектура АСУ ТП - Технологика

<https://ivctl.ru/o-kompanii/blog/nadyozhnost-i-ustojchivost-rezervirovanie-i-dualnaya-arxitektura-asu-tp/>

<sup>11 13 14 15</sup> Энциклопедия АСУ ТП | 2.7. PROFIBUS

<https://www.reallab.ru/bookasutp/2-promishlennye-seti-i-interfeisi/2-7-profibus/>

<sup>12</sup> Просто о Modbus RTU с подробным описанием и примерами

<https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/>

<sup>16</sup> EtherNet/IP: стандартный протокол связи в промышленных сетях » rheonics :: вискозиметр и плотномер

<https://ru.rheonics.com/ethernet-ip-%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D1%81%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%B8-%D0%B2-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85-%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8F%D1%85/>

<sup>17 18</sup> Сети бесшовного резервирования на основе протоколов PRP и HSR с применением коммутаторов Hirschmann серий RED и RSP

<https://www.proxis.ua/ru/show-article/63/>

<sup>19</sup> Технологии резервирования Turbo Ring и Turbo Chain для промышленных сетей связи

[https://nnz-ipc.ru/video/video\\_turbo/](https://nnz-ipc.ru/video/video_turbo/)

20 21 23 Чем отличается SCADA от DCS - Ventkam.ru

<http://ventkam.ru/vajnoe/chem-otlichaetsya-scada-ot-dcs>

22 В ЧЕМ РАЗНИЦА МЕЖДУ DCS И SCADA?

<https://donremteh.ru/v-tchem-raznitsa-mezhdu-dcs-i-scada/>

24 25 26 27 28 29 34 Интеграция ERP и MES-систем: взгляд сверху - Дмитрий Степанов | МИРЭА, ERP, КИС, 1С, SAP и логистика

<https://stepanovd.com/science/34-article-2016-1-er>

30 [PDF] Предиктивная диагностика - Микропроцессорные технологии

<https://i-mt.net/wp-content/uploads/2024/06/Katalog-Prediktivnaya-diagnostika.pdf>

31 32 Что такое предиктивное техническое обслуживание? Краткий обзор 2024 года - Artesis

<https://artesis.com/ru/%D1%87%D1%82%D0%BE-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5-%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B5-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5-%D0%BE-2/>

33 «Прогностика». Автоматизированная система предиктивного ...

[https://esg-a.ru/ru/best-practices/prognostika\\_avtomatizirovannaya\\_sistema%20\\_prediktivnogo\\_analiza\\_i\\_diagnostiki](https://esg-a.ru/ru/best-practices/prognostika_avtomatizirovannaya_sistema%20_prediktivnogo_analiza_i_diagnostiki)