

Электрооборудование общепромышленных установок -

насосы, вентиляторы, компрессоры,
их электропривод, защита,
автоматизация и диспетчеризация



Андрей Повный, <https://t.me/andypovny>

Сайт: [Школа для электрика](#)

Канал в Telegram: [Школа для электрика](#)

Явно полезно: [Электронные учебные пособия](#)

Введение

На любом предприятии, независимо от того, что оно выпускает - трансформаторы, мебель или хлеб, - работает большая группа оборудования, о которой обычно не думают, показывая гостям производство. Пока внимание сосредоточено на станках и линиях сборки, где рождается готовое изделие, где-то в подвале крутится насос, качающий воду в систему отопления, на крыше гудит вентилятор, вытягивающий из цеха горячий воздух, а в отдельном помещении компрессор нагоняет давление в сеть сжатого воздуха для пневмоинструмента. Без этого оборудования производство просто остановится, хотя оно ни одной детали не обрабатывает и ни одного изделия не выпускает.

Такое оборудование в электротехнике принято называть общепромышленными установками. Термин противопоставляет их электротехнологическим установкам - печам, сварочным аппаратам, электролизным ваннам, - которые непосредственно меняют форму, структуру или химический состав обрабатываемого материала за счёт электрической энергии. Общепромышленные установки к материалу не прикасаются: они создают условия, в которых работает всё остальное производство. Это разделение и определяет место главы в структуре пособия - логично, что после рассмотрения технологических электроустановок, отвечающих за прямое воздействие на предмет труда, наступает черёд вспомогательного оборудования, обеспечивающего среду и ресурсы для этого воздействия. А следующий шаг в изложении - переход к электрооборудованию металлообрабатывающих станков, то есть к оборудованию, которое снова напрямую формирует деталь.

Разобраться в устройстве насосных, вентиляционных и компрессорных установок важно не только теоретически. На практике электромонтёру, электромеханику или технику по обслуживанию оборудования приходится регулярно работать именно с этой техникой: искать причину отказа насоса в котельной, настраивать

частотный преобразователь на вентиляционной установке, следить за состоянием компрессорной станции. Каждая авария такого оборудования быстро отражается на всём предприятии - остановится подача воды, перестанет работать вентиляция, закончится сжатый воздух для пневмоинструмента, и производственный процесс замедлится или встанет полностью.

Глава построена по единому плану для каждого вида установок: сначала - назначение и место в технологическом процессе предприятия, затем - принцип действия и разновидности самого механизма (насоса, вентилятора, компрессора), потом - электрооборудование, обеспечивающее его работу, схемы управления и защиты, и в завершение - вопросы автоматизации, эксплуатации и энергосбережения. Такая последовательность выбрана не случайно: сначала важно понять, что делает установка и зачем она нужна производству, а уже затем - как устроена и управляется её электрическая часть.

Раздел 1. Общие сведения об общепромышленных установках

1.1. Определение и место в системе электрооборудования предприятия

Общепромышленными называют установки, которые обеспечивают энерго-снабжение, микроклимат, водоснабжение, сжатый воздух, охлаждение и другие вспомогательные функции производства, но сами не участвуют в обработке изделий. Их работа не связана напрямую с технологическим процессом изготовления продукции: станок делает деталь, печь плавит металл, а насос просто гонит воду по трубе, вентилятор перемещает воздух, компрессор сжимает газ. Убрать станок -

остановится выпуск конкретной детали. Убрать насосную станцию - остановится вся котельная, а вместе с ней и отопление всего цеха.

На промышленном предприятии общепромышленные установки решают следующие задачи.

Вентиляция и кондиционирование удаляют из помещений вредные вещества и поддерживают комфортный микроклимат для персонала и оборудования. Водоснабжение и канализация подают воду потребителям и отводят стоки. Сжатый воздух питает пневматический инструмент и пневмоавтоматику производственных линий. Холодоснабжение охлаждает технологическое оборудование и помещения. Теплоснабжение отвечает за отопление и горячее водоснабжение. Освещение - производственное, аварийное и охранное - обеспечивает видимость и безопасность на территории и в помещениях предприятия.

Таблица 1.1 систематизирует основные виды общепромышленных установок по назначению, режиму работы и типичному диапазону мощности.

Таблица 1.1. Классификация общепромышленных установок

Признак классификации	Категории	Примеры оборудования
По назначению	Энергетические, вентиляционные, насосные, компрессорные, холодильные, отопительные, осветительные	Трансформаторы, вентиляторы, насосы, компрессоры, чиллеры, котлы, светильники

По режиму работы	Непрерывного действия, периодического действия	Вентиляция и освещение работают постоянно; компрессоры и холодильные машины - циклически
По мощности	Малой мощности (до 10 кВт), средней мощности (10-100 кВт), большой мощности (свыше 100 кВт)	Небольшой вентилятор в бытовке - малая мощность; главный вентилятор шахты - большая
По степени автоматизации	Ручное управление, автоматическое управление, дистанционное управление (диспетчеризация)	Кнопочный пуск на месте; ПИД-регулирование по датчику; SCADA-диспетчеризация всего цеха

Из таблицы видно, что один и тот же вид установки - например, насос - может встретиться в любой ячейке классификации: маленький циркуляционный насос отопления работает непрерывно и почти не потребляет энергии, а мощный насос подпитки котельной может включаться периодически и иметь автоматическое управление по уровню в баке. Поэтому при изучении конкретной установки важно смотреть не на общую категорию, а на её реальные параметры и условия работы на данном предприятии.

1.2. Общие принципы построения электропривода вспомогательных установок

При всём разнообразии насосов, вентиляторов и компрессоров их электрическая часть организована очень похожим образом, и это не совпадение. Все три вида механизмов - лопастные или объёмные машины, вращаемые электродвигателем и

перемещающие рабочую среду (жидкость или газ) против сопротивления сети. Отсюда - общая логика построения силовой схемы, независимо от конкретного типа установки.

В основе почти всегда лежит трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Этот тип двигателя занимает подавляющую долю парка электроприводов вспомогательного оборудования - в среднем на насосах и вентиляторах его доля превышает 90%, а на компрессорах - около 95%. Причина проста: асинхронный короткозамкнутый двигатель прост по конструкции, не имеет скользящих контактов (в отличие от двигателя с фазным ротором), надёжен и относительно дешёв. Мощность серийных двигателей этого класса покрывает диапазон от 0,25 до 500 кВт, что покрывает практически весь спектр применений на обычном предприятии.

Двигатель для вспомогательной установки выбирают не только по мощности, но и по конструктивному исполнению и степени защиты оболочки. Исполнение по способу монтажа обозначается кодом IM: IM B3 соответствует двигателю на лапах, IM B5 - фланцевому креплению, а IM B35 объединяет оба варианта крепления в одной конструкции. Степень защиты от пыли и воды обозначается кодом IP по ГОСТ 14254-2015 (гармонизированному с международным стандартом IEC 60529): первая цифра после букв IP показывает защиту от твёрдых частиц, вторая - от влаги. Для общепромышленных двигателей в цехах со средней запылённостью обычно достаточно IP54 (защита от пыли и брызг со всех направлений), для помещений с частой мойкой оборудования применяют IP55, а для погружных насосов - вплоть до IP68, то есть защиты от продолжительного погружения в воду под давлением.

Класс нагревостойкости изоляции обмоток тоже указывается в паспорте двигателя буквой: класс F допускает нагрев до 155 °С, класс H - до 180 °С. Чем выше класс изоляции, тем больше запас двигателя по тепловой нагрузке, что особенно

важно при частых пусках или работе в жарких помещениях (котельные, компрессорные).

Отдельного внимания заслуживает вопрос энергоэффективности двигателей. Международная классификация IE (IE1-IE4) характеризует КПД электродвигателя: чем выше класс, тем меньше потерь при той же полезной мощности. Переход с устаревших двигателей класса IE1 на современные IE3 или IE4 даёт экономию электроэнергии порядка 3-8%, а срок окупаемости такой замены на действующей установке обычно укладывается в 1-3 года - для предприятия это выгодное и относительно быстрое мероприятие по энергосбережению.

1.3. Три способа пуска и регулирования

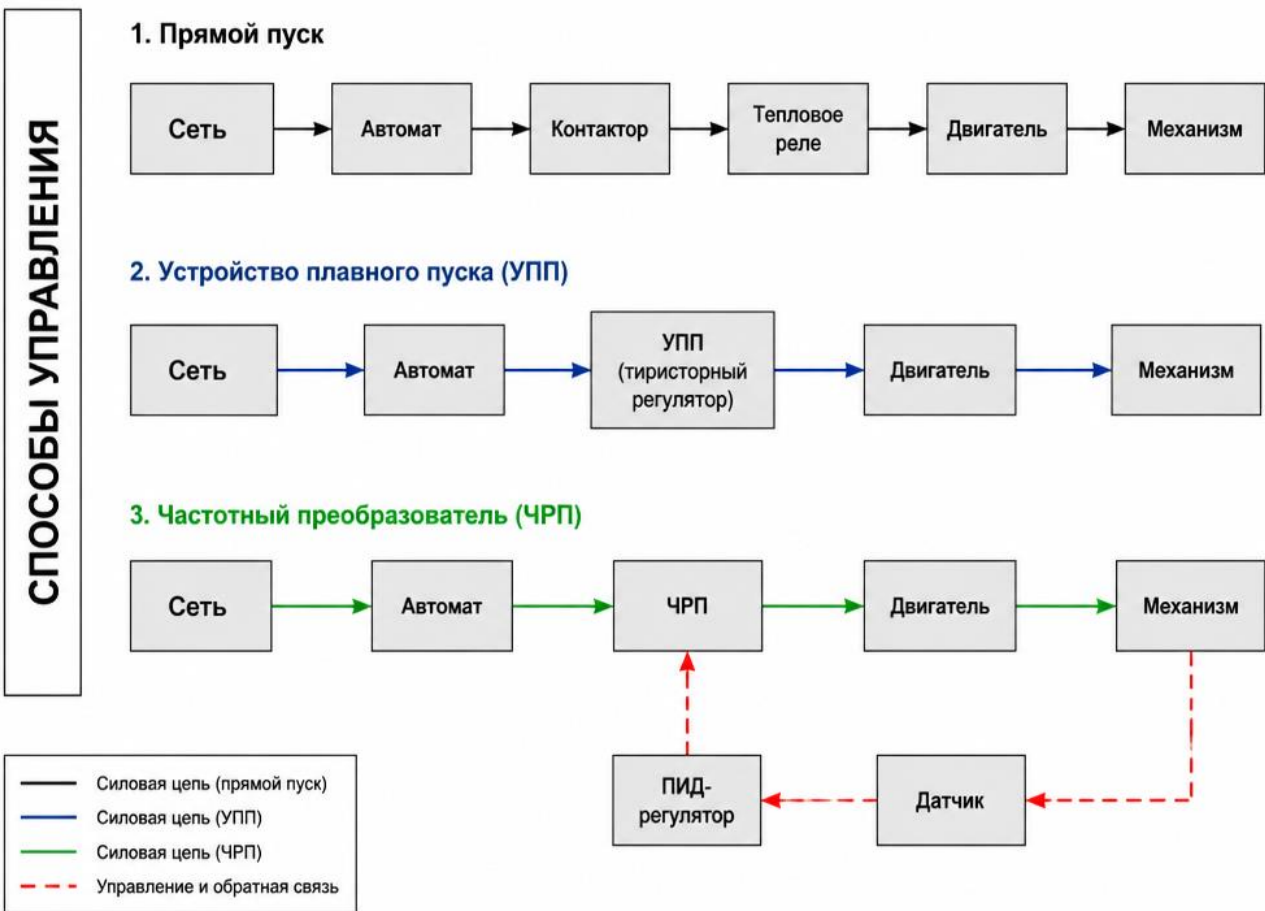
Управление электродвигателем вспомогательной установки строится по одной из трёх принципиальных схем, и понимание различий между ними - ключ к пониманию всей главы, поскольку эти схемы затем повторяются и для насосов, и для вентиляторов, и для компрессоров с минимальными изменениями.

Прямой пуск. Самая простая схема: сеть - автоматический выключатель - контактор - тепловое реле - двигатель - механизм. Контактор замыкает цепь питания обмоток статора напрямую от сети, тепловое реле защищает от перегрузки, автоматический выключатель - от короткого замыкания. Схема применяется для установок малой мощности, обычно до 10 кВт, где пусковой ток - а он у асинхронного двигателя при прямом пуске в 5-7 раз превышает номинальный - не создаёт значимых проблем для питающей сети. Преимущества очевидны: простота и низкая стоимость. Но у прямого пуска два существенных недостатка. Первый - большой пусковой ток, вызывающий просадку напряжения в сети и нагрев обмоток. Второй, особенно важный для насосов, - гидравлический удар: резкий разгон рабочего колеса

насоса вызывает скачок давления в трубопроводе, который со временем разрушает уплотнения, трубопроводную арматуру и стыки труб.

Устройство плавного пуска (УПП). Между сетью и двигателем ставится тиристорный регулятор, который постепенно, в течение 10-30 секунд, поднимает напряжение на обмотках от нулевого до полного. Двигатель разгоняется мягко, пусковой ток снижается до 2-3-кратного номинального, гидравлический удар исключается. Эта схема применяется для установок средней мощности, ориентировочно от 10 до 100 кВт. Недостаток - устройство плавного пуска регулирует только процесс разгона и торможения, но не может поддерживать пониженную рабочую скорость в установившемся режиме, и в тиристорах неизбежно возникают дополнительные потери мощности.

Частотный преобразователь (ЧРП, инвертор). Наиболее совершенное решение: преобразователь меняет частоту и напряжение питания двигателя, позволяя регулировать частоту вращения в широком диапазоне - обычно с отношением 1:100 - и на всём этом диапазоне поддерживать заданный технологический параметр: давление, расход, температуру. Обратную связь дают датчики (давления, температуры, уровня), сигнал с которых обрабатывается ПИД-регулятором - либо встроенным в сам преобразователь, либо реализованным в программируемом логическом контроллере (ПЛК). Частотное регулирование применяется на установках свыше 5 кВт, особенно там, где важно поддерживать технологический параметр с высокой точностью, и даёт заметную экономию электроэнергии - обычно от 20 до 50% в зависимости от типа установки и характера нагрузки. Плата за эти преимущества - более высокая стоимость оборудования и чувствительность электроники преобразователя к качеству питающей сети (перенапряжениям, гармоникам).



Способы управления электродвигателем

Экономический эффект частотного регулирования объясняется не интуицией, а строгой физической зависимостью - так называемым законом подобия лопастных машин, справедливым и для насосов, и для вентиляторов:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

где Q - расход перекачиваемой среды, H - создаваемый напор или давление, P - потребляемая мощность, n - частота вращения рабочего колеса.

Смысл этих трёх формул стоит прочувствовать на конкретном примере, потому что именно он объясняет, почему предприятия так активно вкладываются в

частотные преобразователи. Если снизить частоту вращения насоса или вентилятора всего на 20% (то есть $n_2 = 0,8 \cdot n_1$), расход снизится ровно на те же 20%, напор - уже на 36%, а потребляемая мощность упадёт почти на половину - на 49%. Кубическая зависимость мощности от скорости - вот причина того, что регулирование скоростью в разы выгоднее регулирования дроссельной заслонкой или задвижкой, которые просто гасят излишек давления на трение, переводя электрическую энергию в тепло без всякой пользы.

1.4. Нормативная база эксплуатации вспомогательного электрооборудования

Проектирование, монтаж и эксплуатация электрооборудования общепромышленных установок регулируются комплексом нормативных документов, знание которых обязательно для специалиста электротехнического профиля.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) устанавливают требования к выбору сечения кабелей, степени защиты оболочек оборудования, компоновке электрических щитов и распределительных пунктов, питающих вспомогательные механизмы здания - насосы, вентиляторы, калориферы, установки кондиционирования воздуха. В частности, ПУЭ регламентирует минимальные сечения проводов и кабелей для инженерного оборудования зданий, требования к резервированию питания ответственных потребителей (пожарных насосов, дымоудаления) и правила прокладки сетей во влажных и пыльных помещениях, характерных для насосных и компрессорных станций.

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) определяют порядок содержания и обслуживания уже смонтированного и введённого в работу оборудования: периодичность осмотров, объём и сроки пла-

ново-предупредительных ремонтов, порядок допуска персонала к работам, требования к ведению эксплуатационной документации - журналов, паспортов оборудования, графиков технического обслуживания. Для компрессорных установок ПТЭЭП, в частности, нормирует время восполнения расхода воздуха рабочими компрессорами и требования к контролю параметров сжатого воздуха и масла.

Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок задают требования безопасности при обслуживании насосных, вентиляционных и компрессорных станций: порядок отключения оборудования перед ремонтом, применение блокировок, использование средств защиты, оформление нарядов-допусков на работы с повышенной опасностью.

Отдельную группу составляют государственные стандарты на конкретные виды оборудования - например, уже упомянутый ГОСТ 14254-2015 на степени защиты оболочек электрооборудования, а также стандарты серии ГОСТ на энергоэффективность электродвигателей, соответствующие международной классификации ИЕ.

Практическая рекомендация для будущего специалиста проста: перед вводом в эксплуатацию или ремонтом любой общепромышленной установки нужно свериться не только с паспортом изготовителя, но и с действующими редакциями ПУЭ и ПТЭЭП, поскольку требования по защите персонала и резервированию питания периодически уточняются, а ответственность за их несоблюдение при аварии лежит именно на обслуживающем персонале и ответственном за электрохозяйство предприятия.

Раздел 2. Насосные установки

2.1. Назначение и роль в производственном процессе

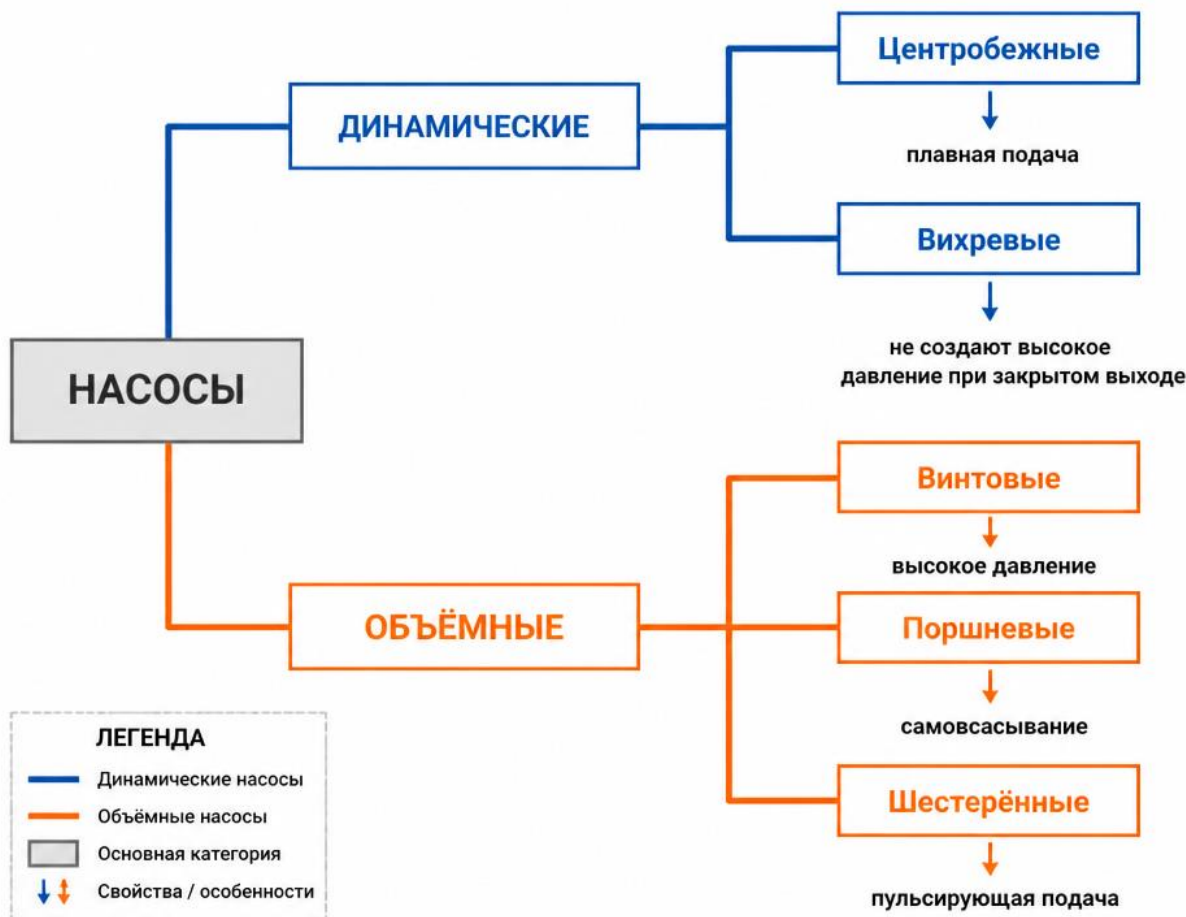
Насосные установки решают одну задачу - перекачивание жидкости и создание необходимого давления в трубопроводной системе, но сфер применения этой задачи на предприятии множество. Насосы обеспечивают водоснабжение - подачу воды потребителям, канализацию - откачку сточных вод, отопление - циркуляцию теплоносителя по батареям и калориферам, вентиляцию и кондиционирование - циркуляцию воды в чиллерах и фанкойлах, а также участвуют напрямую в технологических процессах: подают воду и химикаты в производственные линии, поддерживают давление в противопожарной системе, обеспечивают орошение на прилегающей территории.

На типичном машиностроительном или деревообрабатывающем предприятии одновременно может работать несколько десятков насосов разного назначения - от маленького циркуляционного насоса системы отопления мощностью в доли киловатта до мощной насосной станции водоснабжения на сотни киловатт. Отказ насоса системы охлаждения станка немедленно останавливает обработку, отказ насоса пожаротушения - создаёт угрозу безопасности всего объекта, поэтому надёжность и продуманная защита насосного оборудования имеют не меньшее значение, чем надёжность самих технологических линий.

2.2. Классификация насосов и их характеристики

Все насосы делятся на две большие группы по принципу действия: динамические, где энергия жидкости увеличивается за счёт силового воздействия на неё в проточной части (центробежные, вихревые насосы), и объёмные, где жидкость перемещается порциями в замкнутых объёмах, вытесняемых движущимися элемен-

тами (винтовые, поршневые, шестерённые насосы). Различие принципиально: динамические насосы дают плавную, неп пульсирующую подачу, но не способны создавать высокое давление при закрытом выходе, а объёмные насосы, напротив, развивают высокое давление независимо от расхода и при этом самовсасывают, но их подача обычно пульсирует.



Виды насосов

Таблица 2.1 сводит основные типы промышленных насосов с их рабочими диапазонами и типичными областями применения.

Таблица 2.1. Основные типы насосов и их характеристики

Тип насоса	Принцип действия	Расход	Напор/давление	КПД	Область применения
Центробежный	Жидкость выбрасывается по радиусу под действием центробежной силы рабочего колеса	1-10000 м ³ /ч	5-300 м	60-85%	Водоснабжение, отопление, промышленная перекачка воды
Винтовой (шнековый)	Перемещение вдоль оси винтом-ротором в статоре	0,1-500 м ³ /ч	до 40 бар	50-70%	Мазут, нефть, пищевые сиропы, ил, шлам
Поршневой	Вытеснение поршнем в цилиндре	0,01-100 м ³ /ч	до 1000 бар	70-90%	Гидравлика, дозирование химикатов, мойка высокого давления
Шестерённый	Перемещение между зубьями двух шестерён	0,1-200 м ³ /ч	до 250 бар	70-85%	Гидравлика, смазочные системы, топливо
Вихревой	Движение по вихревой траектории в рабочем колесе	0,1-50 м ³ /ч	до 150 м	30-50%	Малые станции, пожаротушение, автономное водоснабжение

Вертикальный многоступенчатый	Несколько рабочих колёс последовательно наращивают давление	1-500 м³/ч	до 300 м	60-80%	Водоснабжение высотных зданий, промышленные системы
Погружной	Насос полностью погружён в перекачиваемую среду	1-1000 м³/ч	до 100 м	50-75%	Скважины, колодцы, откачка воды из приямков

Из таблицы следует практический вывод, важный для будущего специалиста: подбор насоса начинается не с электрической части, а с технологической задачи. Для перекачки чистой воды на большое расстояние логично выбрать центробежный насос, для вязкого мазута - винтовой, а для точного дозирования небольшого количества химического реагента - поршневой. Ошибка в выборе типа насоса под конкретную среду и режим работы приводит к быстрому износу, а не к экономии.

2.3. Рабочая характеристика насоса и понятие рабочей точки

Каждый насос характеризуется зависимостью создаваемого напора от расхода перекачиваемой жидкости. Эта зависимость приближённо описывается формулой:

$$H = H_0 - k \cdot Q^2$$

где H - напор насоса (в метрах водяного столба), H_0 - напор при нулевом расходе, то есть при полностью закрытой задвижке на выходе, Q - расход, k - коэффициент, зависящий от конструкции конкретного насоса.

Физический смысл формулы прост и легко представить наглядно. При закрытой задвижке насос создаёт максимальный напор, но жидкость никуда не движется - расход равен нулю. По мере открытия задвижки жидкость начинает течь, расход растёт, но напор при этом падает, поскольку часть энергии тратится на преодоление трения в трубе. При полностью открытой задвижке расход максимален, а напор минимален.

Насос никогда не работает "сам по себе" - он всегда включён в конкретный трубопровод, который тоже обладает собственной характеристикой: чем больше расход, тем больше сопротивление сети и тем выше требуемый напор для его преодоления. Точка пересечения характеристики насоса и характеристики сети называется рабочей точкой - именно она определяет фактический расход и напор, которые установятся в системе. Если оператор закручивает задвижку на выходе насоса, характеристика сети "поднимается" (растёт сопротивление), и рабочая точка смещается в сторону меньшего расхода и большего напора. Понимание этой зависимости объясняет, почему регулирование задвижкой - расточительный способ управления производительностью: насос продолжает создавать избыточный напор, а излишек просто гасится на трении, переходя в тепло.

2.4. Электрооборудование и схемы управления насосными установками

Электропривод насоса строится по одной из трёх схем, рассмотренных в общем виде в разделе 1.3: прямой пуск, пуск через устройство плавного пуска или через частотный преобразователь. Применительно к насосным установкам эти схемы обретают конкретные технологические детали, и разница между ними — не абстрактная классификация, а вопрос ресурса оборудования, стоимости монтажа и того, лопнет ли труба через полгода эксплуатации.

Прямой пуск

Силовая цепь здесь предельно проста: сеть 380 В, 50 Гц - автоматический выключатель - контактор - тепловое реле - асинхронный двигатель - насос. Ни электроники, ни настроек - контактор замыкает контакты, и обмотки статора сразу оказываются под полным номинальным напряжением.

Схема применяется для насосов малой мощности, до 10 кВт - например, для циркуляционных насосов небольших систем отопления, дренажных насосов в подвалах или бытовых скважинных насосов. Резкий разгон вала здесь не создаёт серьёзной проблемы гидравлического удара, потому что диаметр труб мал, их протяжённость невелика, а масса воды в системе слишком незначительна, чтобы скачок давления при пуске нанёс ощутимый вред.

Даже на этом уровне мощности расплата за простоту схемы есть, и она носит электрический характер. Пусковой ток асинхронного двигателя превышает номинальный в 5-7 раз - для двигателя на 10 кВт это означает бросок с номинальных 19 А до 100-130 А в первые доли секунды пуска. Ток такой величины греет обмотку статора значительно сильнее номинального режима, а при частых пусках (скажем, если насос включается и выключается по 20-30 раз в сутки, следуя за колебаниями в системе отопления) тепловые циклы накапливаются и ускоряют старение изоляции. Практический ориентир: производители асинхронных двигателей обычно ограничивают число прямых пусков в час - для машин малой мощности это 10-15 включений, и превышение этого лимита сокращает срок службы изоляции обмотки в разы быстрее паспортного ресурса.

Есть и механическая сторона вопроса - ударный момент при пуске нагружает муфту, вал и подшипники насоса рывком, а не плавным нарастанием, что для дешёвых бытовых насосов с пластиковыми рабочими колёсами иногда становится причиной микротрещин на лопастях уже после нескольких сотен циклов.

Устройство плавного пуска

Устройство плавного пуска (УПП) включается в силовую цепь между автоматическим выключателем и двигателем и работает по принципу фазового регулирования напряжения через встречно-параллельные тиристоры на каждой фазе. Вместо того чтобы сразу подать полное напряжение, УПП постепенно, за 10-30 секунд, наращивает его на статоре по заданной рампе - от 30-50% номинального в начале до 100% к концу разгона. Пусковой ток при этом снижается в 2-3 раза по сравнению с прямым пуском, а момент на валу растёт плавно, без рывка.

Схема характерна для насосов средней мощности - примерно 10-100 кВт, - где важно исключить гидравлический удар при пуске крупного насоса, подающего воду в протяжённый трубопровод. Механизм проблемы понятен из курса гидравлики: резкий скачок скорости потока при мгновенном включении насоса создаёт волну давления, которая распространяется по трубопроводу и отражается от closed-концевых элементов - задвижек, обратных клапанов, тупиковых участков сети. Амплитуда этой волны на протяжённых магистралях водоснабжения может достигать нескольких десятков атмосфер сверх рабочего давления, что для чугунных фитингов и старых стальных труб - прямой путь к разрыву шва или трещине во фланцевом соединении.

После завершения разгона большинство УПП переводят двигатель в режим байпаса — силовые тиристоры отключаются механическим или электронным шун-

тирующим контактором, и ток на рабочем режиме идёт напрямую, минуя полупроводниковые ключи. Это защищает тиристоры от перегрева на длительной работе и снижает тепловые потери устройства. При остановке насоса многие модели УПП способны так же плавно, по обратной рампе за несколько секунд, снижать напряжение - эта функция особенно ценна для насосных станций, где резкая остановка большого насоса создаёт гидроудар не меньшей силы, чем резкий пуск.

Частотный преобразователь и контур обратной связи

Частотный преобразователь применяется на насосах свыше 5 кВт, особенно там, где требуется точное регулирование давления или расхода - то есть там, где насос должен не просто включаться и выключаться, а работать в режиме непрерывной подстройки под меняющееся потребление воды.

Принципиальное отличие от УПП: частотный преобразователь не просто смягчает пуск, а меняет саму частоту питающего напряжения, а значит и синхронную частоту вращения ротора на всём диапазоне работы, а не только в момент старта. Силовая цепь дополняется контуром обратной связи: датчик давления в напорном трубопроводе (обычно с выходным сигналом 4-20 мА, установленный после насоса и до запорной арматуры) передаёт сигнал в ПИД-регулятор — встроенный в частотный преобразователь либо реализованный программно в ПЛК. Регулятор непрерывно сравнивает текущее давление с заданной уставкой и изменяет частоту вращения двигателя так, чтобы удерживать заданное значение - например, 4 бар с допустимым отклонением не более 0,1 бар.

Логика работы контура симметрична в обе стороны. Если в сети открывают кран или включается ещё один потребитель, давление в трубопроводе проседает ниже уставки - ПИД-регулятор увеличивает выходную частоту преобразователя,

насос ускоряется и поднимает давление обратно к заданному значению. Когда потребление падает (краны закрываются), регулятор снижает частоту, обороты насоса падают, и избыточного давления в сети не возникает. Настройка такого контура на практике требует последовательного ввода нескольких параметров: номинальных данных двигателя (ток, напряжение, мощность, частота), диапазона измерения подключённого датчика давления и самой уставки давления - ошибка на этапе задания диапазона датчика приводит к тому, что преобразователь неверно интерпретирует входной сигнал и работает нестабильно, разгоняя или тормозя насос рывками там, где должна быть плавная подстройка.

Экономический эффект от такой схемы заметен уже на горизонте года-двух эксплуатации: без частотника избыточное давление в сети традиционно "сбрасывали" дросселированием - прикрытой задвижкой, на которой без всякой пользы теряется часть энергии насоса. Частотное регулирование убирает эти потери, снижая обороты вместо дросселирования, и по опыту эксплуатации насосных станций водоснабжения экономия электроэнергии обычно составляет 20-50% в зависимости от характера графика водопотребления.

Каскадное управление группой насосов

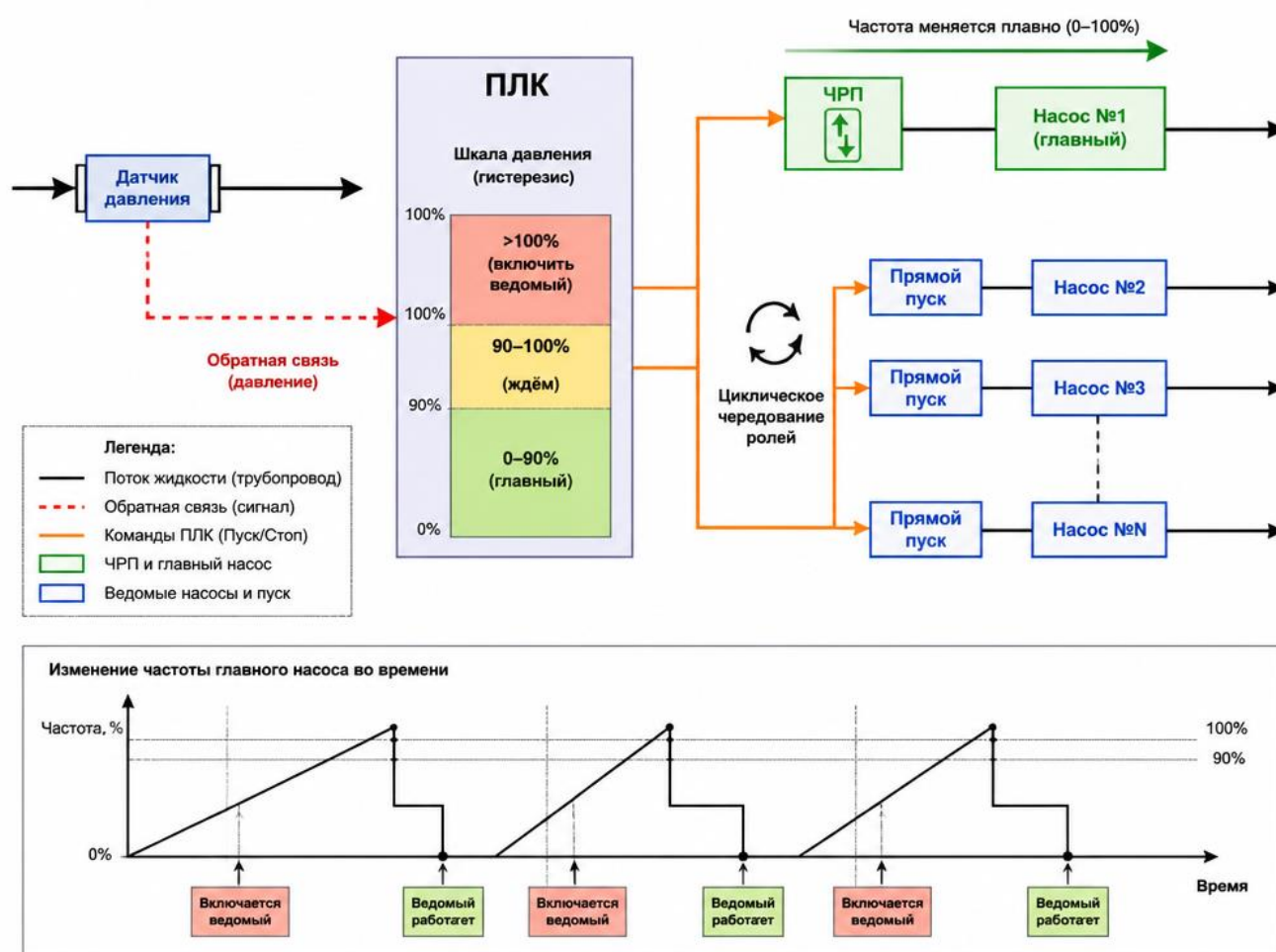
Особый интерес для практики представляет каскадное управление группой насосов, применяемое на насосных станциях средней и большой производительности - в системах водоснабжения предприятий, котельных, повысительных станциях жилых микрорайонов, где расход воды в течение суток меняется в несколько раз и один насос физически не способен эффективно закрыть весь диапазон нагрузок.

Принцип таков: один насос, условно называемый "главным", оснащён частотным преобразователем и плавно меняет свою скорость в ответ на изменение расхода. Остальные насосы станции, "ведомые", подключены через прямой пуск или

устройство плавного пуска и включаются автоматически, когда главный насос достигает максимальной скорости (100% частоты), но потребность в расходе продолжает расти. Логика контроллера здесь простая пороговая схема: как только главный насос выходит на верхний предел частоты и давление всё равно продолжает проседать ниже уставки, контроллер запускает первый ведомый насос, а главный преобразователь при этом снижает частоту, компенсируя добавленный ведомым насосом расход, и снова берёт на себя точную подстройку давления. При дальнейшем росте потребления цикл повторяется - подключается второй ведомый насос, третий, и так до тех пор, пока не будет задействована вся станция. При снижении нагрузки ведомые насосы отключаются в обратном порядке, а главный частотник каждый раз перехватывает регулирование на себя.

Контроллер каскада, реализованный на базе ПЛК, решает ещё одну важную задачу - чередование роли "главного" насоса между агрегатами станции. Без этой функции один и тот же насос, постоянно работающий через частотник в режиме точной подстройки, вырабатывал бы моторесурс и ресурс подшипников заметно быстрее остальных, простаивающих в резерве. Алгоритм чередования обычно строится по одному из двух принципов: либо по суммарному времени работы каждого агрегата (роль главного передаётся насосу с наименьшей накопленной наработкой), либо циклически - при каждом новом цикле "все насосы остановлены" очередь смещается на один агрегат вперёд. Это делается специально, чтобы износ распределялся равномерно между всеми насосами станции, а не концентрировался на одном постоянно нагруженном агрегате, и чтобы при плановом обслуживании или отказе одного насоса станция могла продолжать работу на оставшихся без потери производительности.

На практике реализация каскада требует от программиста ПЛК аккуратной работы с задержками переключения - если пороги подключения и отключения ведомых насосов выставлены слишком близко друг к другу, а не с разумным гистерезисом, система начинает "дребезжать": ведомый насос включается и через несколько секунд снова выключается, что для контактора и электродвигателя равносильно режиму частых прямых пусков со всеми его недостатками, о которых было сказано выше.



2.5. Защита насосных установок

Насосное оборудование редко выходит из строя по одной причине. Обычно сначала возникает отклонение режима - исчезает вода на всасывании, падает напряжение одной из фаз, засоряется рабочее колесо или возрастает нагрузка на вал, - а уже затем перегреваются обмотки, разрушается уплотнение или заклинивает подшипник. Поэтому грамотная схема защиты должна не просто отключать двигатель при коротком замыкании, а перекрывать каждый характерный для данной установки аварийный режим.

Сухой ход

Работа насоса без перекачиваемой жидкости - так называемый «сухой ход» - одна из самых частых причин выхода насосов из строя. Жидкость в насосе выполняет сразу несколько функций: она отводит тепло от рабочих деталей, уменьшает трение в уплотнениях и подшипниках, а в некоторых конструкциях служит непосредственной смазкой для втулок и подшипников скольжения. Если вода или другая рабочая среда исчезает, насос продолжает вращаться, но нормальные условия работы его узлов уже нарушены.

Особенно быстро от сухого хода страдают торцевые уплотнения. Их рабочие поверхности рассчитаны на наличие тонкой жидкостной плёнки, которая отводит тепло и уменьшает износ. Без этой плёнки поверхности начинают нагреваться, могут покрываться трещинами и терять герметичность. У погружных насосов дополнительно ухудшается охлаждение двигателя: вода, окружающая корпус, отводит тепло от обмоток, и при снижении уровня двигатель начинает перегреваться. Время, за которое появляются повреждения, зависит от конструкции, мощности и типа уплотнения, но даже несколько минут работы вхолостую для некоторых агрегатов уже могут оказаться критичными.

Защита строится на датчике уровня жидкости в резервуаре или скважине и реле контроля уровня. Датчик может быть поплавковым, электродным, гидростатическим или ультразвуковым. В простейшей схеме поплавков размыкает цепь управления контактором, когда уровень опускается ниже допустимой отметки. В более сложной установке сигнал поступает в ПЛК, который сначала формирует предупреждение, затем выдерживает небольшую задержку и отключает насос, если уровень не восстановился.

Для скважинных насосов одного датчика минимального уровня бывает недостаточно. Если производительность насоса превышает дебит скважины, вода после включения быстро опускается ниже зоны забора, хотя в начале цикла уровень был нормальным. Поэтому в контроллере предусматривают защиту от частых повторных пусков: после отключения по сухому ходу насос получает разрешение на повторный запуск только через заданный интервал. Такая пауза позволяет уровню воды восстановиться и одновременно не превращает неисправность в серию опасных пусков.

Перегрузка двигателя

Перегрузка возникает, когда двигатель длительно развивает момент, превышающий расчётный. Для насоса это может быть следствием увеличения гидравлического сопротивления, засорения фильтра, изменения плотности перекачиваемой жидкости, износа подшипников или механического подклинивания рабочего колеса. В результате ток двигателя возрастает, а выделяемое в обмотках тепло увеличивается приблизительно пропорционально квадрату тока: при увеличении тока в 1,5 раза тепловые потери в меди возрастают примерно в 2,25 раза.

В стандартной схеме перегрузку контролируют тепловое реле и автоматический выключатель. Тепловое реле реагирует на длительное превышение тока и отключает цепь управления контактором с выдержкой времени. Такая задержка необходима, чтобы реле не срабатывало при кратковременном пусковом токе. Автоматический выключатель выполняет другую задачу: его электромагнитный расцепитель быстро отключает цепь при коротком замыкании, а тепловой расцепитель также может защищать линию от длительной перегрузки.

Уставку теплового реле выбирают по номинальному току двигателя, указанному на паспортной табличке, а не по мощности насоса в рекламном описании. Если реле настроено слишком высоко, двигатель будет работать с опасным перегревом до момента отключения. Если уставка занижена, защита начнёт отключать насос при нормальном рабочем режиме, особенно во время пуска или кратковременного увеличения подачи.

На установках с частотным преобразователем отдельное тепловое реле в выходной цепи применяют не всегда. Преобразователь получает данные о номинальном токе и тепловой модели двигателя и контролирует ток, момент, время разгона и степень нагрузки. Это позволяет обнаружить перегрузку быстрее и точнее, чем обычное механическое тепловое реле, но только при правильно введенных паспортных параметрах двигателя. Сам частотный преобразователь не отменяет автоматическую защиту от короткого замыкания и не заменяет защиту от аварий, которые он не способен измерить.

Перегрев обмоток

Токовая защита оценивает нагрев косвенно. Она предполагает, что чем больше ток и чем дольше он протекает, тем выше температура проводников. Однако реальная температура обмотки зависит также от температуры окружающей

среды, качества вентиляции, частоты вращения и состояния корпуса двигателя. Поэтому двигатель может перегреваться даже при токе, близком к номинальному, если забиты вентиляционные каналы, температура в помещении слишком высока или насос работает на пониженной частоте с недостаточным охлаждением.

Перегрев обмоток фиксируют термисторы или термоконтакты, встроенные непосредственно в пазы статора. Такой датчик находится там, где возникает опасная температура, и реагирует на фактическое состояние обмотки, а не на расчётный ток. Сигнал от термистора поступает в специальное реле или на вход ПЛК, после чего контактор отключает двигатель, а система управления записывает причину остановки и передаёт сигнал аварии оператору.

Термодатчик и тепловое реле не дублируют друг друга полностью. Тепловое реле хорошо защищает от продолжительной перегрузки, а встроенный термистор реагирует на непосредственный нагрев обмотки. Поэтому в ответственных установках применяют оба вида защиты: один контролирует электрическую нагрузку, второй - фактическую температуру двигателя.

Повторный запуск после перегрева нельзя выполнять сразу после остывания корпуса. Температура наружной поверхности уже может снизиться, тогда как внутри обмотки и в узлах изоляции ещё сохраняется повышенный нагрев. В автоматике предусматривают выдержку времени, блокировку повторного пуска и регистрацию аварии. Если защита срабатывает регулярно, следует искать причину, а не просто увеличивать уставку.

Обрыв фазы

Обрыв одной из фаз питающей сети - опасная авария, при которой двигатель иногда продолжает вращаться на двух фазах. Внешне это может выглядеть обман-

чиво: насос не остановился, контактор остаётся включённым, а рабочее колесо продолжает подавать жидкость. Но токи в оставшихся фазах возрастают, магнитное поле становится несимметричным, и обмотки начинают быстро перегреваться.

Для двигателя мощностью несколько десятков киловатт достаточно короткого времени работы в таком режиме, чтобы температура изоляции приблизилась к недопустимому значению. Особенно опасен обрыв фазы под нагрузкой. Если фаза пропала во время пуска, двигатель может не набрать обороты, будет гудеть и потреблять большой ток, что создаёт дополнительную угрозу для обмоток.

Обрыв, перекос и неправильное чередование фаз выявляет реле контроля фаз. Такие устройства постоянно контролируют наличие всех фаз, соотношение напряжений, порядок их чередования и, в зависимости от модели, величину асимметрии. При обнаружении аварии реле размыкает контакт в цепи катушки контактора, и двигатель отключается. Реле контроля фаз применяют не только для насосов, но и для компрессоров, вентиляторов, станков и других трёхфазных электроприёмников.

Контроль чередования фаз важен и для насосной части. При неправильном порядке фаз асинхронный двигатель вращается в обратную сторону. Для центробежного насоса это означает резкое падение подачи, возможное нарушение работы обратного клапана и появление режима, на который насос не рассчитан. Поэтому после подключения нового двигателя проверяют не только наличие напряжения, но и направление вращения рабочего колеса.

В частотном приводе аналогичные функции обычно выполняет встроенная система контроля входного питания. Она может обнаруживать пропадание фазы, просадку напряжения, асимметрию и другие нарушения. Но конкретный набор функций зависит от модели преобразователя и должен проверяться по руководству

изготовителя. Устройство управления насосом нельзя считать защищённым только потому, что в его составе есть частотный преобразователь.

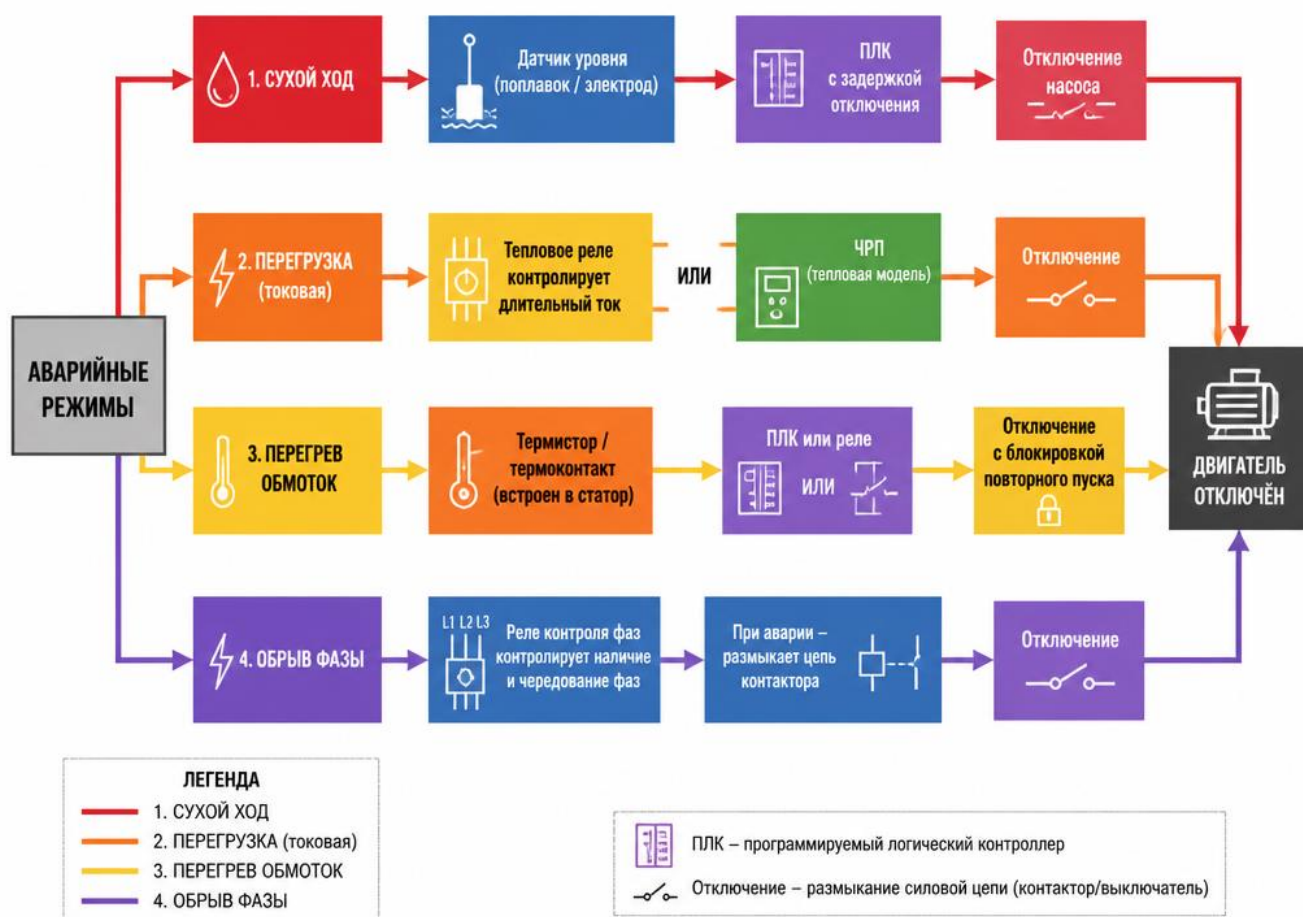
Заклинивание рабочего колеса

Заклинивание рабочего колеса или вала возникает, например, из-за попадания посторонних предметов в проточную часть, наматывания волокнистого мусора, разрушения подшипника или образования отложений на внутренних поверхностях насоса. В этот момент двигатель пытается развить момент, необходимый для вращения неподвижного вала. Скорость вращения падает, а ток резко возрастает.

Если двигатель подключён напрямую, заклинивание определяют по превышению потребляемого тока и по отключению теплового реле. Но тепловое реле реагирует с задержкой, потому что его задача - защищать от нагрева, а не мгновенно распознавать механическую блокировку. Если конструкция насоса допускает быстрое повреждение, в шкафу управления используют электронное реле перегрузки или специальный контроллер, который сравнивает фактический ток с допустимым и отключает двигатель за более короткое время.

На приводах с частотным преобразователем заклинивание можно определить по одновременному росту тока, увеличению момента и падению фактической скорости. Преобразователь способен остановить двигатель по функции защиты от блокировки или по превышению момента. В системах, где необходим точный контроль положения вала, применяют энкодер. Он передаёт контроллеру информацию о фактической скорости вращения, и если команда на запуск подана, а импульсы от энкодера отсутствуют либо их частота существенно ниже заданной, ПЛК формирует аварию «нет вращения» и отключает привод.

Энкодер нужен не каждому насосу. Его применение оправдано на установках, где стоимость аварии высока, скорость должна контролироваться с большой точностью или одного измерения тока недостаточно. Для обычной насосной станции чаще оказывается рациональнее сочетание контроля тока, встроенной защиты частотного преобразователя, датчика давления и алгоритма контроля времени разгона.



Логика аварийного отключения

Защиты насосной установки должны не только отключать двигатель, но и передавать оператору понятную причину остановки. Сигналы «сухой ход», «перегрев», «перегрузка», «обрыв фазы» и «нет вращения» нельзя объединять в один

безымянный контакт «авария». После такого отключения оператор будет вынужден проверять всю установку, а иногда просто несколько раз нажмёт кнопку пуска, не устранив исходную неисправность.

В программе ПЛК каждой аварии назначают отдельный признак, задержку срабатывания и способ восстановления. Сухой ход может требовать автоматического повторного запуска после восстановления уровня, перегрев - ручного подтверждения после осмотра, а заклинивание - полного снятия напряжения и механической очистки насоса. Силовая схема при этом должна оставаться независимой от программной логики в тех случаях, когда отказ ПЛК не должен лишать оборудование защиты.

Насосная автоматика считается правильно выполненной не тогда, когда в шкафу установлено много реле, а тогда, когда для каждого опасного процесса заранее определены измеряемый признак, порог отключения, время реакции и порядок повторного запуска. Только при таком подходе защита действительно продлевает срок службы двигателя и насоса, а не просто фиксирует аварию после того, как повреждение уже произошло.

2.6. Диспетчеризация и учёт на насосных станциях

На насосной станции авария редко начинается с полной остановки оборудования. Сначала давление медленно уходит от заданного значения, один из насосов начинает работать дольше обычного, возрастает ток двигателя или уровень в резервуаре подходит к критической отметке. Если оператор видит только лампы «работа» и «авария» на шкафу управления, значительная часть этой информации остаётся незамеченной. Именно для наблюдения за процессом, накопления данных и дистанционного управления современные насосные станции средней и большой мощности оснащаются системами диспетчеризации на базе SCADA.

SCADA расшифровывается как Supervisory Control and Data Acquisition, то есть «диспетчерское управление и сбор данных». Это не отдельный прибор и не только программа, установленная на компьютере диспетчера. SCADA представляет собой программно-аппаратный комплекс, в который входят датчики, программируемые логические контроллеры, модули ввода-вывода, каналы связи, серверы, рабочие станции и программное обеспечение визуализации. В техническом смысле SCADA работает на верхнем, диспетчерском уровне управления, тогда как непосредственные защитные и регулирующие действия выполняются локальным ПЛК или контроллером насосной станции.

От датчика до диспетчера

На нижнем уровне системы расположены датчики и исполнительные механизмы. Датчики давления устанавливают на всасывающем и напорном трубопроводах, расходомеры - на общем напорном коллекторе или отдельных линиях, уровнемеры - в резервуарах, приёмных камерах и скважинах. В зависимости от назначения станции дополнительно контролируют температуру подшипников и обмоток, вибрацию агрегата, положение задвижек, наличие протечки, ток двигателя, частоту вращения и состояние частотного преобразователя.

Сигналы от этих устройств поступают в ПЛК. Аналоговые датчики обычно передают унифицированный сигнал 4-20 мА, а дискретные устройства формируют состояние «включено-выключено», «норма-авария» или импульсный сигнал расхода. Расходомер может передать не только текущее значение подачи, но и количество перекачанной воды за определённый период. ПЛК опрашивает входы, фильтрует случайные помехи, сравнивает значения с уставками и выполняет локальную логику управления.

Это разделение функций принципиально важно. Если канал связи с диспетчерской временно пропал, насосная станция не должна немедленно потерять управление. ПЛК продолжает поддерживать давление, выполнять каскадное включение насосов и отключать оборудование по сигналам защит. SCADA в данном случае наблюдает за процессом, архивирует параметры и передаёт оператору информацию, но не должна быть единственным устройством, от которого зависит безопасная работа насоса.

После обработки в ПЛК данные передаются на верхний уровень по промышленной сети Ethernet. На локальных объектах применяют также промышленные протоколы обмена, например Modbus TCP, OPC UA или другие протоколы, предусмотренные изготовителем контроллера и SCADA-платформы. Если насосная станция расположена далеко от предприятия или диспетчерского пункта, каналом связи могут служить оптоволоконная линия, радиоканал, Wi-Fi, GSM/4G-модем или защищённое VPN-соединение. В реальной системе часто предусматривают основной и резервный каналы: при отказе проводной линии данные временно передаются через сотовую сеть.

Что видит диспетчер

На экране диспетчера насосная станция обычно представлена мнемосхемой. На ней отображаются резервуары, трубопроводы, насосы, задвижки и измерительные приборы. Цветовая индикация показывает состояние объекта: зелёный цвет означает нормальную работу, серый - остановленное оборудование, жёлтый - предупреждение или отклонение режима, красный - аварию.

По каждому насосному агрегату диспетчер видит, включён ли двигатель, работает ли он от сети или через частотный преобразователь, на какой частоте враща-

ется, какой ток потребляет и сколько часов поработал. Если насос остановлен, система может показать причину остановки: команда оператора, отсутствие разрешения по уровню, перегрузка, перегрев, сухой ход, неисправность преобразователя или авария по давлению.

На той же мнемосхеме отображаются текущие значения давления и расхода. Диспетчер видит не только давление на напорном коллекторе, но и разницу между давлением на всасывании и нагнетании. Это помогает отличить неисправность насоса от проблемы в трубопроводе. Например, падение давления на всасывании при нормальной работе двигателя может указывать на засорение фильтра или нехватку воды в резервуаре. Если давление на выходе падает, а ток двигателя и частота преобразователя находятся около верхнего предела, вероятнее всего, станция не справляется с возросшим расходом или в системе появился повышенный гидравлический режим.

Особенность SCADA состоит в том, что оператор видит не отдельные показания приборов, а взаимосвязанную картину процесса. Рост расхода сопровождается изменением давления, увеличением частоты главного насоса и подключением ведомого агрегата. Если такая последовательность нарушается, система может сформировать предупреждение ещё до того, как давление выйдет за аварийную границу.

Архивы и журнал событий

Текущая цифра на экране показывает состояние станции только в данный момент. Для анализа работы этого недостаточно, поэтому SCADA архивирует измеряемые параметры и сохраняет их в виде временных рядов. На графике давления можно увидеть суточные колебания водопотребления, длительность пиковых

нагрузок и моменты просадки напора. На графике расхода заметны периоды минимальной подачи, резкие открытия потребителей и нехарактерные изменения режима.

Обычно система сохраняет тренды давления, расхода, уровня, тока, частоты вращения и температуры. По этим данным можно сравнить работу насосной станции в разные дни, определить изменение режима по сезонам и заметить постепенное ухудшение характеристик. Если для получения прежнего давления насосу требуется всё большая частота вращения, это может указывать на износ рабочего колеса, загрязнение трубопровода или изменение гидравлического сопротивления сети.

Отдельно ведётся журнал событий. В нём фиксируются пуски и остановки насосов, срабатывания защит, пропадание связи, изменение уставок, переход на резервный канал и действия операторов. Каждое событие получает временную отметку. Благодаря этому после аварии можно восстановить последовательность событий: например, сначала снизился уровень в резервуаре, через пять секунд сработала блокировка сухого хода, затем остановился главный насос, а ещё через несколько секунд давление опустилось ниже минимального значения.

Журнал нужен не только для расследования аварий. По числу пусков оценивают нагрузку на контакторы и двигатели, по моточасам планируют техническое обслуживание, а по расходу воды формируют отчёты для энергетической и эксплуатационной служб. Суточные, недельные и месячные отчёты позволяют сравнивать фактическое потребление электроэнергии и воды, выявлять неэкономичные режимы и обосновывать замену насосов или модернизацию системы управления. Подобные функции - архивирование трендов, фиксация событий с временными метками и учёт моточасов - являются типовыми для диспетчеризации насосных станций.

Дистанционное управление

При необходимости диспетчер может удалённо включить или отключить насос, изменить заданное давление, переключить рабочий агрегат или сбросить аварийный сигнал. Например, если ночью расход воды снизился, оператор уменьшает уставку давления, и частотный преобразователь снижает скорость двигателя. Если один насос выведен в ремонт, диспетчер переводит его в состояние «запрещён дистанционный запуск», после чего контроллер исключает агрегат из каскада.

Однако команда с рабочего места не должна обходить местные защиты. Если в резервуаре недостаточный уровень, удалённая команда «Пуск» не должна включить насос. Аналогично насос не запускается при активной защите от перегрева, открытой не в том положении задвижке или неисправности частотного преобразователя. SCADA передаёт операторскую команду в ПЛК, а ПЛК проверяет условия разрешения пуска и самостоятельно принимает окончательное решение.

Для ответственных операций применяют разграничение прав доступа. Один оператор может только наблюдать за параметрами и подтверждать сообщения, другой получает право изменять уставки, а запуск резервного насоса или перевод станции в ручной режим разрешается только персоналу с более высоким уровнем полномочий. Изменения уставок и команды управления должны записываться в журнал вместе с учётной записью пользователя и временем действия.

Удалённый доступ особенно требует осторожности на объектах, связанных с водоснабжением предприятия, котельной или жилого района. Промышленная сеть управления не должна без ограничений подключаться к общей корпоративной или публичной сети. На практике применяют сегментацию сети, межсетевые экраны, VPN, индивидуальные учётные записи и резервный порядок местного управления. Рекомендации по защите SCADA и других систем промышленной автоматизации

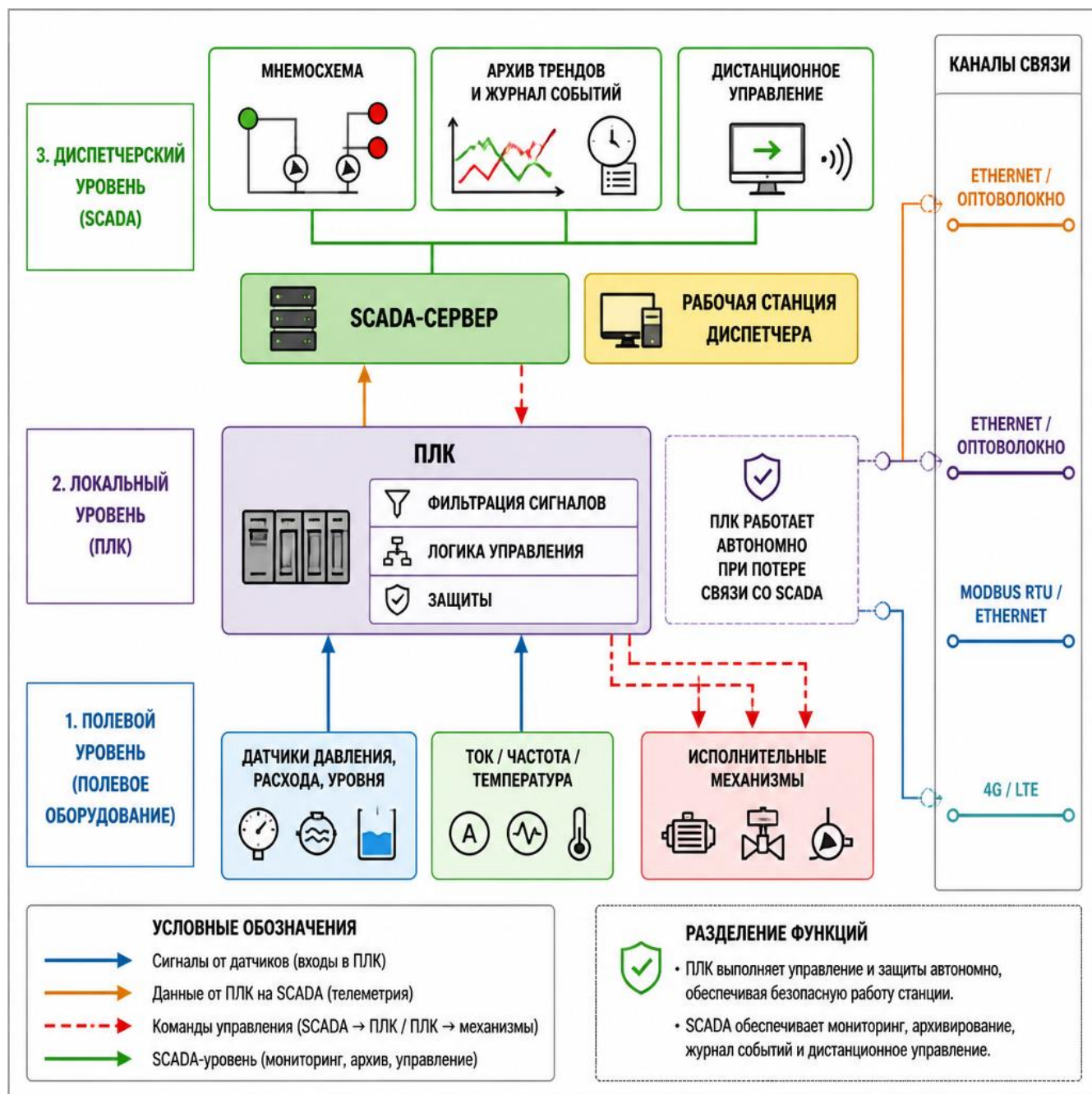
отдельно учитывают требования к надёжности, безопасности процесса и сохранению локального управления при отказе внешних коммуникаций.

Зачем станции диспетчеризация

Диспетчеризация не заменяет автоматику шкафа управления. Её задача другая: собрать разрозненные сведения от удалённых агрегатов, представить их оператору в понятном виде, сохранить историю работы и дать возможность вмешаться в процесс без выезда на объект. Если локальный контроллер отвечает на вопрос «что должна делать станция прямо сейчас», то SCADA помогает ответить на вопросы «что происходило последние сутки», «почему насос остановился» и «как изменится режим после модернизации».

На небольшой насосной достаточно автомата, контактора, реле уровня и местного поста управления. На станции с несколькими насосами, протяжёнными трубопроводами и изменяющимся расходом отсутствие архива и удалённого контроля быстро превращается в эксплуатационную проблему. Оператор узнаёт об аварии с опозданием, техническая служба не располагает достоверной историей, а решение о ремонте принимается по субъективным наблюдениям.

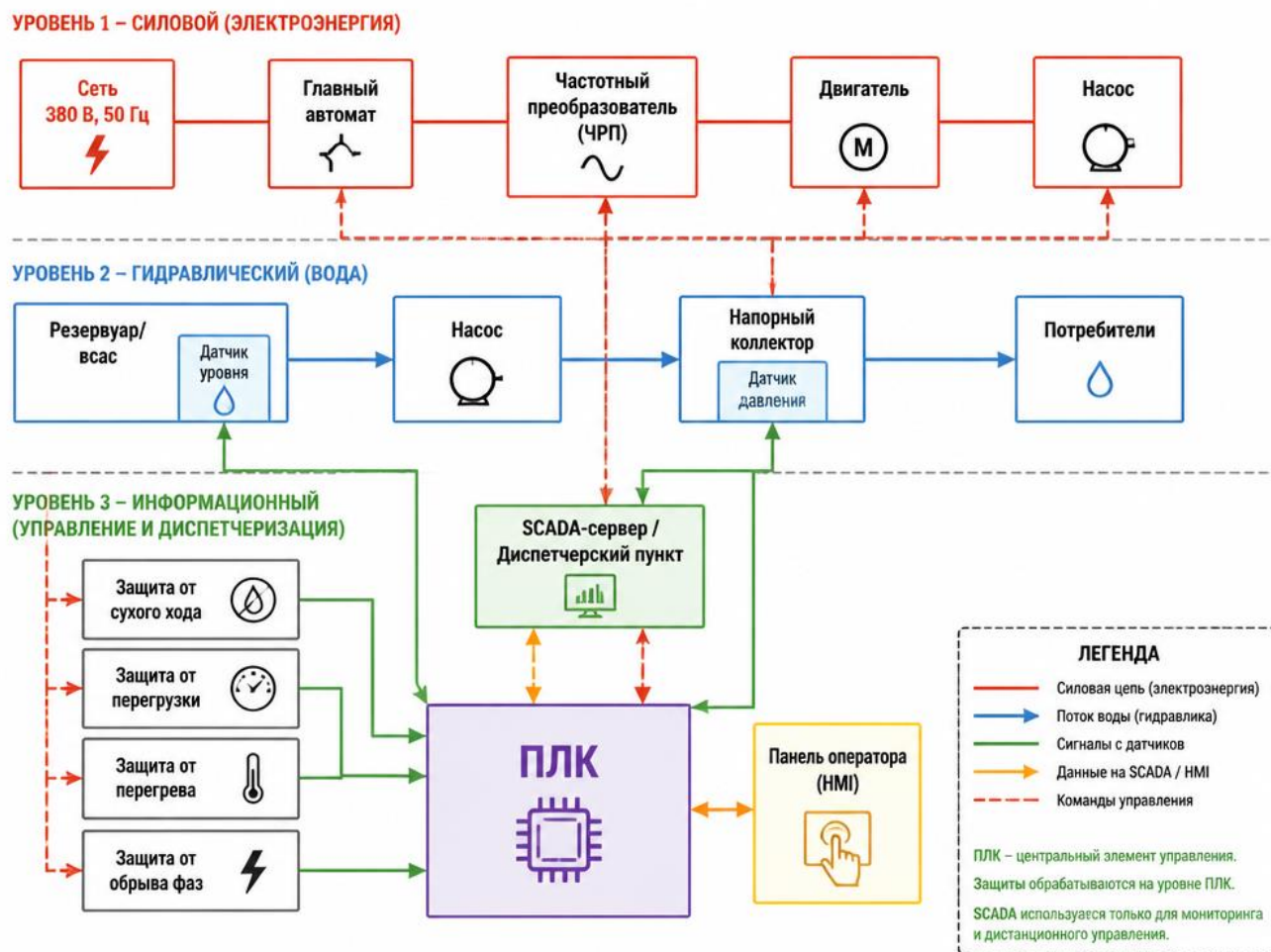
SCADA переводит насосную станцию из режима периодического осмотра в режим постоянного наблюдения. Давление, расход, уровень и состояние двигателей становятся не отдельными показаниями, а последовательностью данных, по которой можно судить о состоянии всей гидравлической системы. Именно поэтому диспетчеризация особенно полезна там, где простой насоса означает остановку технологической линии, нарушение теплоснабжения или перебои с водой у большого числа потребителей.



2.7. Пример современной насосной станции: разбор структурной схемы

Рассмотрим типичную структуру автоматизированной насосной станции водоснабжения промышленного предприятия, в которой объединены силовое оборудование, измерительные приборы, локальная автоматика и диспетчерская система.

Такая станция не сводится к трём насосам, подключённым к сети. Это согласованный комплекс, где каждый элемент выполняет свою задачу: автоматический выключатель принимает энергию от сети и защищает ввод, частотные преобразователи управляют двигателями, датчики описывают состояние воды, ПЛК принимает решения, а панель оператора и SCADA показывают человеку происходящее.



Силовая часть станции

Питание станции подаётся от трёхфазной сети 380 В, 50 Гц через главный автоматический выключатель. Его назначение состоит не только во включении и отключении всей установки. Он защищает вводные кабели и распределительное

устройство от токов короткого замыкания и длительной перегрузки, а также позволяет полностью обесточить шкаф при техническом обслуживании.

После главного автомата питание поступает на распределительную систему шкафа управления. От неё получают энергию частотные преобразователи, цепи управления, источники питания 24 В постоянного тока, средства измерения и оборудование связи. Для трёх насосных агрегатов предусмотрены три частотных преобразователя, каждый из которых питает отдельный асинхронный двигатель. Вал двигателя соединён с рабочим колесом центробежного насоса непосредственно через муфту либо через другой предусмотренный конструкцией приводной узел.

Частотный преобразователь получает напряжение промышленной сети, выпрямляет его, накапливает энергию в звене постоянного тока и формирует на выходе трёхфазное напряжение требуемой частоты и амплитуды. Благодаря этому двигатель может разгоняться без резкого броска тока, а в установившемся режиме работать не обязательно на номинальной частоте 50 Гц. Если расход в системе уменьшился, привод снижает частоту вращения, и насос не создаёт избыточный напор, который пришлось бы гасить дросселированием.

Для центробежного насоса это имеет особое значение. При неизменном диаметре рабочего колеса расход приблизительно пропорционален частоте вращения, напор изменяется пропорционально квадрату скорости, а потребляемая мощность - приблизительно кубу скорости. Поэтому при снижении скорости до 80% от номинальной теоретическая мощность на валу составляет около 51,2% номинальной. Реальный результат зависит от характеристики насоса, трубопровода, КПД двигателя и преобразователя, однако сама закономерность объясняет, почему частотное регулирование особенно полезно при переменном водопотреблении.

В составе силового шкафа предусматривают аппараты защиты и коммутации, входные и выходные реакторы при необходимости, устройства защиты от перенапряжений, цепи аварийного отключения и вентиляцию. Частотные преобразователи выделяют тепло, поэтому недостаточный воздухообмен внутри шкафа может привести к их перегреву даже тогда, когда двигатели работают с нормальным током. В ответственном оборудовании контролируют состояние вентиляторов, температуру внутри шкафа и наличие открытых дверей.

Измерение давления и уровня

Давление в напорном коллекторе контролируется датчиком давления. Его устанавливают в точке, где измеряемое значение действительно характеризует давление в питаемой сети. Если датчик расположен слишком близко к рабочему колесу, он может реагировать на пульсации и местные гидравлические потери. Если же он удалён от насосной станции на значительное расстояние, показание будет отражать уже не только работу насосов, но и состояние длинного трубопровода.

Датчик передаёт в систему управления унифицированный сигнал, например 4-20 мА. Нижняя граница соответствует нижнему пределу диапазона измерения, верхняя - верхнему. Если используется датчик с диапазоном 0-10 бар, сигнал 12 мА приблизительно соответствует давлению 5 бар. В программе ПЛК этот электрический сигнал пересчитывается в инженерные единицы, после чего становится доступен регулятору, оператору и системе архивирования.

Уровень воды в приёмном резервуаре контролируется датчиками уровня. Для непрерывного измерения применяют гидростатические, ультразвуковые или радарные уровнемеры. Дополнительно могут использоваться дискретные поплавковые или электродные датчики верхнего и нижнего аварийных уровней. Такая комбинация даёт два независимых признака: аналоговый уровнемер показывает, сколько

воды осталось, а аварийный датчик непосредственно запрещает работу насоса при достижении опасной отметки.

Сигнал минимального уровня участвует в логике защиты от сухого хода. Если воды в приёмном резервуаре недостаточно, ПЛК снимает разрешение на запуск или останавливает уже работающий насос. После восстановления уровня повторный пуск выполняется не мгновенно, а через заданную задержку. Это позволяет избежать частого включения и отключения насоса около границы срабатывания датчика.

На практике полезно контролировать не только абсолютное значение уровня, но и скорость его изменения. Если резервуар быстро опустошается, а насосы работают на максимальной частоте, система может заранее сформировать предупреждение. Оператор получит время для уменьшения уставки, отключения части агрегатов или проверки поступления воды в резервуар.

Работа ПЛК

Сигналы от датчиков, частотных преобразователей, аппаратов защиты и местных кнопок поступают в программируемый логический контроллер. ПЛК является центральным элементом локальной автоматики, но его нельзя смешивать с диспетчерской SCADA. Контроллер работает непосредственно с оборудованием и должен продолжать выполнение основного алгоритма даже при потере связи с верхним уровнем.

ПЛК получает давление в напорном коллекторе, текущий уровень в резервуаре, состояние каждого привода, токи двигателей, частоты вращения и сигналы аварий. На основании этих данных он формирует команды частотным преобразователям, поддерживает давление и определяет, сколько насосов должно работать в данный момент.

В нормальном режиме один из агрегатов назначается главным. Его частотный преобразователь изменяет скорость так, чтобы давление соответствовало заданной уставке. Например, оператор установил требуемое давление 4 бар. При небольшом расходе главный насос работает на сниженной частоте. Когда потребление воды возрастает, ПИД-регулятор увеличивает частоту, насос повышает подачу, а давление возвращается к установленному значению.

Если главный насос достигает верхнего ограничения частоты, но давление продолжает снижаться, ПЛК подключает второй агрегат. После этого частота первого насоса уменьшается, и он снова переходит в режим регулирования. При дальнейшем росте расхода аналогично подключается третий насос. Когда потребление воды уменьшается, ведомые агрегаты отключаются, а главный насос принимает на себя оставшуюся нагрузку.

В программе задают задержки включения и отключения, минимальное время работы, минимальную паузу между пусками и гистерезис по давлению. Эти параметры предотвращают ситуацию, при которой насос включается и выключается через несколько секунд из-за небольшого колебания измеряемого давления. В противном случае автоматическая система сама создаёт режим частых пусков, ускоряющий износ двигателей, контакторов и насосной арматуры.

ПЛК также чередует насосы. Роль главного агрегата может переходить к насосу с наименьшей наработкой либо изменяться циклически после завершения рабочего цикла. При отказе одного преобразователя контроллер исключает соответствующий насос из алгоритма и пытается сохранить давление за счёт оставшихся агрегатов. Если производительности недостаточно, на панель оператора и в SCADA передаётся предупреждение о работе станции с ограниченной резервной мощностью.

Панель оператора

Оператор станции взаимодействует с системой через панель оператора, установленную на лицевой стороне шкафа управления. Панель НМІ показывает локальную мнемосхему: состояние насосов, давление, уровень, частоты преобразователей, токи двигателей и активные аварийные сообщения.

С панели можно выбрать режим работы станции: автоматический, ручной или местный. В автоматическом режиме решения принимает ПЛК согласно программе. В ручном режиме оператор может подать команду на отдельный насос, но защитные блокировки обычно сохраняются. Местный режим применяется при наладке и техническом обслуживании, когда управление выполняется кнопками или переключателями непосредственно на шкафу.

На экране отображаются не только текущие значения, но и причина запрета запуска. Насос может не включаться из-за низкого уровня воды, активной защиты двигателя, отсутствия связи с частотным преобразователем, закрытой задвижки или выбранного режима «насос выведен в ремонт». Такая индикация заметно сокращает время поиска неисправности.

Панель также позволяет изменить заданное давление в пределах разрешённого диапазона, выбрать насосы для обслуживания, просмотреть моточасы и подтвердить аварийное сообщение. Критические параметры защищают паролем, чтобы случайное касание экрана не изменило уставку и не нарушило работу станции.

Связь с SCADA

Данные о работе всей станции передаются в центральную SCADA-систему предприятия. На диспетчерском пункте оператор видит не только одну насосную, но и другие объекты предприятия: резервуары, технологические линии, котельные,

узлы учёта и распределительные пункты. Для каждой станции выводятся давление, расход, уровень, состояние насосов, аварии и качество связи.

SCADA архивирует параметры и события. По графику давления можно оценить суточный график водопотребления, по току - увидеть изменение нагрузки двигателя, а по моточасам - определить, насколько равномерно распределена работа между агрегатами. Если давление поддерживается той же уставкой, но насосы постепенно переходят на более высокую частоту, это может указывать на засорение трубопровода, износ рабочего колеса или изменение характеристик сети.

Диспетчер может удалённо изменить уставку давления, вывести насос в резерв, включить или отключить агрегат и подтвердить сообщение об аварии. Но команда SCADA не должна обходить защиту, реализованную в ПЛК. Даже если оператор дал команду на запуск, контроллер обязан проверить уровень воды, состояние двигателя, наличие разрешения от частотного преобразователя и отсутствие аварийных блокировок.

Для промышленного объекта важна и регистрация действий персонала. Изменение уставки, запуск насоса, перевод станции в ручной режим и сброс аварии должны записываться в журнал с указанием времени и пользователя. Такой журнал позволяет понять, что произошло после изменения режима, и исключает ситуацию, когда после аварии никто не может установить, кто и какую команду подал.

Защита и результат модернизации

Типовая станция должна отключать насосы при сухом ходе, перегрузке, перегреве двигателя, обрыве или недопустимом перекосе фаз, заклинивании рабочего колеса, превышении давления и потере критически важных сигналов. Отдельно контролируют исправность датчика давления. Обрыв сигнальной линии 4-20 мА

нельзя воспринимать как нормальное нулевое давление, иначе система может начать опасно разгонять насос, пытаясь компенсировать мнимую просадку.

Защита от превышения давления также требует двух уровней. ПИД-регулятор поддерживает рабочую уставку, например 4 бар, а независимый аварийный предел отключает насосы при недопустимом повышении давления. Рабочий регулятор предназначен для плавного управления, аварийная защита - для предотвращения повреждения трубопровода и арматуры.

Такая станция выполняет сразу несколько функций: автоматически поддерживает давление, подключает насосы при росте расхода, отключает их при снижении нагрузки, чередует агрегаты для равномерного износа, защищает от сухого хода и электрических аварий, архивирует параметры и передаёт сведения диспетчеру. Постоянное присутствие персонала непосредственно у оборудования уже не требуется, однако это не означает полного отказа от периодических осмотров и технического обслуживания.

Экономический эффект складывается из нескольких составляющих. Частотное регулирование уменьшает потери, которые при нерегулируемом приводе возникали бы на дросселирующей арматуре. Для насосов с переменным графиком нагрузки снижение скорости может дать значительную экономию, поскольку мощность центробежного насоса зависит от скорости приблизительно по кубической зависимости. Плавный разгон и остановка уменьшают гидравлические удары, а значит, снижают нагрузку на муфты, подшипники, обратные клапаны и трубопровод.

Но фиксированное значение «30-40%» нельзя обещать для любой станции. Фактическая экономия зависит от графика водопотребления, статического напора, сопротивления трубопроводов, диапазона регулирования, КПД насосов и того, чем

управляли раньше - задвижкой, включением насосов по порогам или уже существующим частотным приводом. Поэтому корректный расчёт выполняют по измеренному графику мощности, давления и расхода до модернизации и после неё.

Главный результат автоматизации состоит не только в уменьшении счета за электроэнергию. Оборудование начинает работать по измеряемым параметрам, аварии фиксируются с указанием причины, ресурс насосов распределяется равномернее, а эксплуатационная служба получает историю, на основании которой можно принимать технические решения. Для промышленного предприятия это означает переход от периодического контроля отдельных агрегатов к управлению всей насосной станцией как единой системой.

2.8. Практический пример: расчёт экономии от модернизации насосной станции

Чтобы почувствовать масштаб экономического эффекта не абстрактно, а в цифрах, разберём характерный пример - модернизацию насосной станции с тремя насосами по 55 кВт каждый, работающей в непрерывном режиме.

До модернизации станция работала по устаревшей схеме: прямой пуск двигателей и регулирование расхода дроссельной задвижкой. Суммарное годовое потребление электроэнергии трёх насосов, работающих круглосуточно, составляет:

$$3 \times 55 \text{ кВт} \times 24 \text{ ч} \times 365 \text{ дней} = 1\,444\,200 \text{ кВт}\cdot\text{ч в год}$$

После модернизации станция получила частотные преобразователи и каскадное управление. При типичной для такой модернизации экономии в 40% годовое потребление снижается на:

$$1\,444\,200 \times 0,4 = 577\,680 \text{ кВт}\cdot\text{ч в год}$$

Стоимость модернизации складывается из трёх частотных преобразователей (условно по 5000 у.е. за штуку, итого 15 000 у.е.), нового шкафа управления с контроллером (5000 у.е.) и работ по монтажу и пусконаладке (5000 у.е.) - итого около 25 000 у.е. При условной цене электроэнергии 0,10 у.е. за кВт·ч годовая экономия в денежном выражении составит примерно 57 800 у.е., а срок окупаемости вложений - меньше полугода. Этот пример показывает: технически грамотное решение по автоматизации вспомогательного оборудования часто окупается быстрее, чем модернизация основного технологического оборудования, именно потому, что насосы и вентиляторы работают почти непрерывно, а кубическая зависимость мощности от скорости даёт огромный выигрыш даже при небольшом снижении требуемой производительности.

Раздел 3. Вентиляционные установки

3.1. Назначение вентиляционных систем на предприятии

Вентиляционные установки решают задачу поддержания приемлемого состава и параметров воздуха в производственных и служебных помещениях. Их функции разнообразны: общеобменная вентиляция подаёт и удаляет воздух в помещениях в целом, местная вытяжная вентиляция убирает вредные вещества непосредственно от источника их выделения - станка, сварочного поста, печи, приточная вентиляция подаёт очищенный и подогретый воздух снаружи, вытяжная - удаляет загрязнённый воздух изнутри, а приточно-вытяжная система объединяет обе функции в одном комплексе. Кондиционирование дополнительно поддерживает задан-

ную температуру и влажность, аспирация удаляет мелкую пыль и стружку непосредственно от станочного оборудования, а дымоудаление - специальная система, включающаяся при пожаре для отвода дыма из помещений и эвакуационных путей.

На производствах с выделением пыли, паров растворителей, сварочных аэрозолей или избыточного тепла вентиляция - не удобство, а требование охраны труда: концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны строго нормируется, и без работающей вытяжки эксплуатация оборудования просто не допускается контролирующими органами.

3.2. Классификация вентиляторов

Вентиляторы различаются по конструкции рабочего колеса и характеру движения воздуха в проточной части. Таблица 3.1 сопоставляет четыре основных типа.

Таблица 3.1. Типы промышленных вентиляторов

Тип вентилятора	Принцип действия	Расход	Давление	КПД	Область применения
Радиальный (центробежный)	Воздух выбрасывается по радиусу под действием центробежной силы	100-100000 м³/ч	100-5000 Па	60-85%	Системы вентиляции зданий, аспирация, котельные
Осевой	Воздух движется вдоль оси рабочего колеса	500-200000 м³/ч	50-500 Па	70-90%	Общеобменная вентиляция, охлаждение оборудования, тоннели

Диагональный	Комбинация радиального и осевого принципов	100-5000 м³/ч	200-1500 Па	60-75%	Кондиционеры, фанкойлы
Диаметральный	Воздух проходит через колесо по диаметру	50-2000 м³/ч	50-300 Па	50-70%	Кондиционеры, тепловые завесы

Практическое правило выбора типа вентилятора простое: там, где нужно преодолеть большое сопротивление сети (длинные воздуховоды, фильтры, циклоны в системах аспирации), выбирают радиальный вентилятор, а там, где сопротивление сети невелико, но важны компактность, высокий КПД и низкий шум (общеобменная вентиляция цеха, охлаждение оборудования) - осевой.

3.3. Характеристика вентилятора и рабочая точка

Зависимость создаваемого вентилятором давления от расхода воздуха описывается формулой того же вида, что и для насоса:

$$H = H_0 - k \cdot Q^2$$

где H - давление, развиваемое вентилятором (в паскалях), H_0 - давление при закрытой заслонке (нулевой расход), Q - расход воздуха, k - конструктивный коэффициент.

Логика та же, что и для насоса: при закрытой воздушной заслонке давление максимально, а расход равен нулю; при полностью открытой заслонке давление минимально, а расход максимален. Рабочая точка вентиляционной системы определяется пересечением характеристики вентилятора с характеристикой воздуховодной

сети, и при изменении положения заслонки (либо загрязнении фильтров, что увеличивает сопротивление сети) рабочая точка смещается точно так же, как у насосной системы.

3.4. Электрооборудование и схемы управления вентиляторами

Электропривод вентиляторов практически полностью повторяет логику насосных установок, рассмотренную в разделе 2.4. И здесь применяются прямой пуск, устройство плавного пуска и частотный преобразователь, а состояние двигателя контролируется аппаратами защиты и программой ПЛК. Изменяется главным образом технологический параметр: насос перемещает жидкость и поддерживает давление в трубопроводе, а вентилятор перемещает воздух и поддерживает давление в воздухопроводе, расход воздуха или температуру в обслуживаемом помещении.

Для центробежного вентилятора справедливы те же законы подобия, что и для центробежного насоса. Производительность приблизительно пропорциональна частоте вращения, создаваемое давление зависит от квадрата скорости, а потребляемая мощность - от её куба. Поэтому вентилятор не обязательно должен постоянно работать на номинальных оборотах. Если расход воздуха в данный момент невелик, снижение скорости часто оказывается экономичнее, чем работа на полной производительности с последующим закрытием заслонки.

Прямой пуск вентилятора

При прямом пуске силовая цепь имеет обычную структуру: сеть 380 В, 50 Гц, автоматический выключатель, контактор, тепловое реле, асинхронный двигатель и рабочее колесо вентилятора. После замыкания контактора на статор двигателя сразу подаётся полное напряжение сети, поэтому двигатель быстро разгоняется до рабочей скорости.

Прямой пуск применяется для вентиляторов небольшой мощности, ориентировочно до 10 кВт. Такая схема встречается в небольших вытяжных установках, вентиляции складских помещений, вспомогательных системах охлаждения и отдельных вентиляторах местных отсосов. Если вентилятор работает нечасто, а его производительность не требуется изменять, применение сложного регулируемого привода может быть экономически неоправданным.

Но воздушная сеть не всегда спокойно переносит резкий пуск. Рабочее колесо вентилятора обладает моментом инерции, а протяжённый воздуховод имеет собственное аэродинамическое сопротивление. При включении двигатель развивает повышенный момент, воздух быстро приходит в движение, возникают шум, вибрация и кратковременный скачок давления. Для вентилятора небольшой мощности это обычно не приводит к разрушению воздуховода, но создаёт нагрузку на ременную передачу, подшипники, муфты и крепления.

Пусковой ток асинхронного двигателя при прямом подключении может в несколько раз превышать номинальный. При редких включениях это не представляет серьёзной проблемы, но при частой работе по командам термостата или датчика присутствия двигатель постоянно проходит через тяжёлый переходный режим. Поэтому даже малый вентилятор требует ограничения числа пусков, правильной настройки теплового реле и проверки того, что двигатель успевает разогнаться до очередного отключения.

Устройство плавного пуска

Устройство плавного пуска включается между автоматическим выключателем и двигателем. С помощью тириستоров оно ограничивает действующее напря-

жение на статоре и постепенно увеличивает его по заданной временной рампе. Двигатель разгоняется мягче, уменьшается пусковой ток, а момент на валу нарастает без резкого рывка.

УПП применяют для вентиляторов средней мощности, примерно от 10 до 100 кВт, когда прямой пуск вызывает заметную просадку напряжения, сильный шум, вибрацию или механическую нагрузку на привод. Особенно полезна такая схема для крупных вытяжных вентиляторов, вентиляторов дымоудаления, градирен, сушильных установок и систем, где рабочее колесо имеет большую инерцию.

Время разгона выбирают по характеристикам двигателя и вентилятора. Слишком короткая рампа мало отличается от прямого пуска, а слишком длинная может привести к длительной работе двигателя в режиме повышенного скольжения и нагреву обмоток. Для конкретного агрегата время разгона задают по инструкции изготовителя и проверяют по току, времени выхода на рабочую скорость и отсутствию вибрации.

После завершения пуска многие УПП переходят в режим байпаса. Байпасный контактор шунтирует тиристоры, и двигатель получает питание непосредственно от сети. Это уменьшает тепловые потери в шкафу и позволяет длительно работать без постоянного нагрева полупроводниковых ключей. При останове может применяться обратная рампа, при которой скорость вентилятора снижается плавно, без резкого изменения давления в воздуховоде.

Устройство плавного пуска не заменяет частотный преобразователь. Оно облегчает переход из состояния покоя в рабочий режим, но после разгона вентилятор обычно продолжает вращаться с постоянной скоростью. Если требуется менять производительность в зависимости от температуры, давления или качества воздуха, нужен регулируемый привод либо отдельный способ изменения расхода.

Частотное регулирование

Частотный преобразователь применяется для вентиляторов свыше 5 кВт, особенно там, где требуется точное регулирование по датчикам. Он изменяет частоту и амплитуду выходного напряжения, поэтому скорость асинхронного двигателя можно менять в широком диапазоне. Вентилятор в таком случае работает не по принципу «полная мощность или остановка», а с той производительностью, которая необходима системе в данный момент.

Контур обратной связи обычно замыкается на датчик давления в воздуховоде. Типовая уставка может составлять около 500 Па с допустимым отклонением ± 50 Па. Если фильтр загрязняется, заслонка меняет положение или увеличивается сопротивление сети, давление отклоняется от заданного значения. ПИД-регулятор сравнивает измеренное давление с уставкой и изменяет частоту преобразователя, увеличивая или уменьшая скорость вентилятора.

Если в системе открывается дополнительная ветвь воздуховода, давление может снизиться. Регулятор повышает частоту, вентилятор увеличивает подачу, и значение возвращается к уставке. Если часть помещений отключена и аэродинамическое сопротивление сети изменилось, частотник снижает обороты. Заслонки при этом не приходится прикрывать настолько сильно, поэтому уменьшаются потери давления и шум.

Другой распространённый вариант - регулирование по температуре воздуха в помещении. Например, задана температура 22 °С с допустимым отклонением ± 1 °С. Датчик температуры передаёт сигнал в ПЛК или непосредственно в управляющий контур привода. При превышении температуры вентиляция увеличивает производительность, удаляя нагретый воздух или подавая больше охлаждённого. После возвращения температуры к заданному диапазону скорость вентилятора снижается.

Один и тот же вентилятор может работать по нескольким условиям. Например, основной контур поддерживает давление в воздуховоде, а аварийный алгоритм ограничивает максимальную температуру двигателя. В помещении с вредными выделениями дополнительно контролируют концентрацию газа или пыли. В этом случае производительность вентиляции определяется не только комфортом, но и санитарными требованиями.

Работа по расписанию

Для вентиляционных систем характерно управление по расписанию. Вентиляция включается утром перед началом рабочей смены, работает в течение дня, снижает производительность в ночное время и полностью отключается в выходные, когда предприятие не работает. Такая логика реализуется в ПЛК обычным таймером, календарным планировщиком или расписанием, заданным через панель оператора и SCADA.

Запуск за 15-30 минут до прихода работников позволяет заранее проветрить помещение и вывести температуру, влажность или концентрацию загрязнений к требуемому уровню. Если включать вентиляцию строго в момент начала смены, первые сотрудники окажутся в помещении до того, как система успеет создать нормальный воздухообмен. Время предварительного запуска зависит от объёма помещения, производительности вентилятора и характера выделений.

Ночное снижение производительности не всегда означает полное отключение. В складском помещении достаточно уменьшить скорость до минимально допустимой, а в лаборатории, сварочном участке или помещении с постоянными вредными выбросами вентиляция может быть обязана работать непрерывно. Поэтому календарный график должен иметь приоритет ниже аварийных и технологических сигналов.

Если датчик дыма, газа или превышения температуры подаёт аварийный сигнал, ПЛК отменяет обычное расписание и переводит установку в специальный режим. Вентилятор может быть включён на максимальную производительность, а некоторые приточные агрегаты - отключены, чтобы не распространять дым или опасные вещества по зданию. Конкретная логика зависит от назначения вентиляционной системы и требований проекта.

Экономия энергии

Работа вентилятора «впустую» происходит тогда, когда помещение пусто, технологический процесс остановлен, а агрегат продолжает перемещать максимальный объём воздуха. В этом случае электрическая энергия расходуется на преодоление сопротивления воздухопроводов, фильтров, решёток и заслонок, хотя полезная вентиляционная задача отсутствует.

Частотное регулирование позволяет уменьшить скорость вместо того, чтобы постоянно дросселировать поток. Для вентиляторов действует кубическая зависимость: при снижении скорости до 80% идеализированная мощность составляет около 51% номинальной. Отсюда следует, что уменьшение оборотов на 20% может дать гораздо больший эффект, чем простое снижение производительности на 20%.

Но эту зависимость нельзя переносить на любую установку без расчёта. На результат влияют статическое давление, характеристика сети, состояние фильтров, КПД двигателя, потери в частотном преобразователе и минимально допустимый воздухообмен. В некоторых технологических помещениях нельзя снижать производительность только ради экономии, если это нарушает требования по удалению вредных веществ.

Экономия складывается не только из снижения скорости. Уменьшаются пусковые токи, реже срабатывают механические передачи, снижается шум, а двигатель

и рабочее колесо меньше нагружаются резкими переходными процессами. Если график работы составлен правильно, вентиляционная система расходует энергию главным образом тогда, когда она действительно нужна.

Защита и автоматика

Электропривод вентилятора защищают от короткого замыкания, перегрузки, перегрева, обрыва фазы и заклинивания рабочего колеса. На двигателе могут быть установлены термисторы, а в частотном преобразователе задаются номинальный ток, мощность, частота и другие паспортные параметры. Для крупных вентиляторов дополнительно контролируют вибрацию, температуру подшипников, давление до и после фильтра, состояние ремня и положение защитной решётки.

Вентиляция часто связана с другим оборудованием. Приточный вентилятор не должен запускаться, если закрыта необходимая заслонка, а вытяжной агрегат может получить разрешение только после открытия клапана. При загрязнении фильтра система передаёт предупреждение, но продолжает работу. Если же давление стало слишком низким или поток воздуха исчез, ПЛК формирует аварийное сообщение и запрещает дальнейший запуск до выяснения причины.

Панель оператора показывает состояние двигателя, текущую частоту, давление в воздуховоде, температуру, режим по расписанию и активные блокировки. Через SCADA диспетчер может увидеть график работы вентиляции, количество часов наработки, историю аварий и фактическое выполнение заданного режима. Это позволяет отличить неисправность привода от технологической причины: например, от забитого фильтра или закрытой заслонки.

Таким образом, электропривод вентилятора повторяет общую логику насосной установки, но регулируемый параметр определяется задачей вентиляции. В одном случае поддерживается давление около 500 Па, в другом - температура 22 °С,

в третьем - заданный расход или концентрация вредного вещества. Простая система работает по расписанию, более сложная получает сигналы от датчиков и изменяет скорость двигателя через частотный преобразователь. Разница между этими вариантами заключается не столько в самом электродвигателе, сколько в том, какую величину должна поддерживать автоматика и насколько быстро она должна реагировать на изменение условий.

3.5. Защита вентиляционных установок

Вентиляторная установка должна быть защищена не только от электрических аварий самого двигателя. В приточной системе вентилятор связан с воздушными заслонками, фильтрами, калорифером, клапанами и циркуляционным насосом. Неисправность одного элемента способна создать опасный режим для другого. Например, вентилятор может быть полностью исправен, но его работа при закрытой заслонке или остановленном насосе калорифера приведёт к замерзанию теплообменника.

Схема защиты электропривода вентилятора включает контроль перегрузки двигателя тепловым реле, автоматическим выключателем или встроенной защитой частотного преобразователя, контроль перегрева обмоток термисторами, контроль обрыва и перекоса фаз реле контроля фаз, а также контроль заклинивания рабочего колеса по резкому росту тока или остановке вращения.

Электрические защиты

Перегрузка двигателя возникает, если вентилятор длительно работает с нагрузкой выше расчётной. Причиной может быть засорение фильтра, увеличение сопротивления воздуховода, неисправность подшипника, перекос рабочего колеса

или попадание постороннего предмета в проточную часть. Двигатель при этом потребляет повышенный ток, а потери в обмотках растут пропорционально квадрату тока.

В установке с контакторным пуском перегрузку контролирует тепловое реле. Оно размыкает цепь управления контактором после выдержки времени, не реагируя на кратковременный пусковой ток. Автоматический выключатель выполняет другую функцию: его электромагнитный расцепитель отключает линию при коротком замыкании, а тепловой расцепитель может реагировать на длительную перегрузку питающего кабеля.

В приводе с частотным преобразователем ток и нагрузка двигателя контролируются электронными средствами. В преобразователь вводят номинальный ток, мощность, напряжение и частоту двигателя, после чего привод сравнивает фактический режим с заданными параметрами. Он может отключить двигатель при перегрузке, превышении момента, длительном разгоне или блокировке рабочего колеса. Но встроенная функция преобразователя не отменяет вводной защиты и не заменяет проверку правильности настройки.

Перегрев обмоток контролируют термисторы или термоконтакты, встроенные в статор. Тепловое реле оценивает состояние двигателя косвенно, по току, а термистор реагирует на фактическую температуру в зоне обмотки. Причём двигатель может перегреваться и при токе около номинального значения, если загрязнены вентиляционные каналы, в помещении высокая температура или нарушено охлаждение. Поэтому на ответственных вентиляционных установках токовая и температурная защиты дополняют друг друга.

Обрыв одной из фаз опасен тем, что трёхфазный двигатель иногда не останавливается сразу. Он продолжает вращаться, но токи в оставшихся фазах возрастают,

магнитное поле становится несимметричным, а обмотки начинают быстро нагреваться. Реле контроля фаз выявляет пропадание фазы, недопустимый перекос и неправильное чередование фаз. Частотный преобразователь также может контролировать входное питание, но конкретный набор защит зависит от его конструкции и настроек.

Заклинивание рабочего колеса определяют по резкому росту тока, превышению момента или падению скорости вращения. Причиной может быть обрыв ремня, разрушение подшипника, попадание мусора или деформация рабочего колеса. Если в системе установлен датчик скорости или энкодер, ПЛК сравнивает команду на вращение с фактическим количеством импульсов. При поданной команде и отсутствии вращения привод отключается, а оператор получает сообщение «механическая блокировка» или «нет вращения».

Почему замерзает калорифер

Особенность приточной вентиляции, которой обычно не встречается у насосов и компрессоров, - необходимость защищать водяной калорифер от замерзания. Калорифер представляет собой теплообменник, через трубки которого циркулирует вода или другой теплоноситель, а снаружи проходит поток воздуха. Зимой через него может поступать наружный воздух с температурой ниже 0 °С.

Если циркуляция теплоносителя нарушена, трубки калорифера перестают получать достаточное количество тепла. Причиной может быть отказ насоса малого контура, закрытый клапан, завоздушивание системы, загрязнение фильтра, недостаточная температура теплоносителя или потеря электропитания. Вода в отдельных участках теплообменника охлаждается до температуры замерзания и расширяется при переходе в лёд.

Замерзший участок увеличивается в объёме и создаёт значительное внутреннее давление. Трубки могут деформироваться, разорваться или потерять герметичность в местах пайки и соединения с коллекторами. После размораживания авария нередко обнаруживается не сразу: теплообменник начинает протекать, вода попадает в вентиляционную камеру, а повреждение требует демонтажа и ремонта калорифера.

Опасность состоит в том, что вентилятор при этом может работать нормально. Его двигатель вращает рабочее колесо, автоматика видит расход воздуха, но внутри калорифера уже развивается процесс замерзания. Поэтому защита должна контролировать не только вентилятор, но и температуру теплоносителя, температуру воздуха после калорифера и наличие циркуляции.

Датчики защиты от замерзания

Один из распространённых вариантов - датчик температуры обратного теплоносителя. Его устанавливают на обратном трубопроводе калорифера. Если температура воды, возвращающейся из теплообменника, снижается ниже допустимого значения, контроллер делает вывод, что калорифер получает недостаточно тепла или циркуляция нарушена.

Другой вариант - капиллярный термостат или датчик температуры воздуха после калорифера. Чувствительный элемент располагают непосредственно за теплообменником, иногда растягивая капиллярную трубку по ширине воздушного потока. Это позволяет обнаружить не только общее охлаждение воздуха, но и локальный холодный участок, который может появиться из-за неравномерной циркуляции теплоносителя.

Для повышения надёжности применяют оба контроля. Датчик обратной воды оценивает состояние водяного контура, а датчик воздуха после калорифера непосредственно контролирует вероятность замерзания в воздушной части. Величина уставки зависит от проекта, типа теплоносителя и требований изготовителя. В качестве ориентиров часто применяют пороги порядка $+5...+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обратной воды, а воздушный термостат срабатывает при приближении температуры за калорифером к опасной границе, например около $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Датчик должен контролироваться и на обрыв линии. Если система воспримет обрыв сигнального кабеля как нормальную температуру, защита фактически исчезнет. В ответственных установках неисправность датчика считается отдельной аварией, при которой вентилятор запрещается запускать до восстановления измерительного канала.

Действия автоматики

При угрозе замерзания ПЛК не ограничивается одной командой «выключить вентилятор». Типовая последовательность состоит из нескольких действий. Сначала система подаёт сигнал на включение циркуляционного насоса калорифера. Затем открывает регулирующий клапан теплоносителя, часто на 100%, чтобы быстро увеличить подачу тепла. После этого приточный вентилятор останавливается, а наружная воздушная заслонка закрывается.

Если в установке имеется утеплённая заслонка с возвратной пружиной, её закрытие не зависит только от программной команды. При исчезновении питания привод возвращается в безопасное положение и прекращает поступление морозного воздуха. Циркуляционный насос калорифера при этом должен продолжать ра-

ботать, обеспечивая движение теплоносителя через трубки. Такая последовательность рекомендована для систем, где останов вентилятора без закрытия наружной заслонки не устранил бы приток холодного воздуха.

После срабатывания защиты автоматика выдерживает время, необходимое для восстановления температуры. Вентилятор не включается сразу после кратковременного возврата датчика в норму. Сначала проверяют, что температура обратной воды стабилизировалась, насос циркуляции работает, клапан занимает требуемое положение, а наружная заслонка полностью открывается только после предварительного прогрева калорифера.

Для критических объектов защиту от замерзания переводят на ручной сброс. В этом случае после аварии оператор должен осмотреть установку, проверить насос, клапан, фильтр, температуру теплоносителя и состояние калорифера. Автоматический повторный запуск без проверки может привести к повторению аварии и окончательному разрушению теплообменника.

Связь с вентиляционным агрегатом

Работа вентилятора должна быть разрешена только при выполнении необходимых условий: наружная заслонка открыта в требуемое положение, клапан калорифера работает, циркуляционный насос получил команду и подтверждение работы, фильтр не создаёт чрезмерного перепада давления, а датчики температуры исправны. Если хотя бы одно условие не выполнено, ПЛК запрещает запуск или отключает уже работающий агрегат.

Обычно предусматривают предварительный прогрев калорифера. Сначала включается насос малого контура, затем открывается клапан теплоносителя, и только после достижения требуемой температуры воздуха или обратной воды за-

пускается приточный вентилятор. Такая задержка занимает несколько минут, но защищает теплообменник от подачи холодного воздуха в момент, когда циркуляция ещё не установилась.

Давление до и после воздушного фильтра можно контролировать датчиком перепада давления. Постепенный рост перепада говорит о загрязнении фильтра и необходимости обслуживания. Если фильтр полностью забит, вентилятор будет работать с повышенной нагрузкой, а требуемый воздухообмен не будет обеспечен даже при увеличении частоты частотного преобразователя.

В системах с резервным вентилятором отказ рабочего агрегата передаётся в ПЛК. Контроллер останавливает неисправный привод, проверяет готовность резервного и выполняет его запуск, если это допускают условия по температуре, заслонкам и калориферу. Но резервный вентилятор не должен включаться при активной угрозе замерзания, если причина аварии связана с отсутствием теплоносителя.

Практическая логика защиты

На панели оператора и в SCADA желательно разделять несколько сообщений, которые внешне могут привести к одной и той же остановке. «Низкая температура обратной воды», «низкая температура воздуха после калорифера», «насос калорифера не работает», «не закрылась наружная заслонка» и «неисправен датчик температуры» требуют разных действий персонала.

Если объединить их в общее сообщение «авария вентилятора», оператор может заменить двигатель, хотя настоящая причина находится в водяном контуре. Подробная диагностика сокращает время поиска неисправности и не позволяет несколько раз подряд запускать установку без устранения угрозы.

Таким образом, защита вентилятора состоит из обычной электрической части и специальной климатической логики. Электрические защиты предохраняют двигатель и привод от перегрузки, перегрева, обрыва фазы и механической блокировки. Защита от замерзания сохраняет уже не двигатель, а водяной калорифер и всю приточную установку. При снижении температуры автоматика включает циркуляцию теплоносителя, открывает водяной клапан, останавливает вентилятор и закрывает наружную заслонку. Для надёжной работы эти действия должны выполняться не изолированно, а как единая последовательность, запрограммированная в ПЛК и отображаемая оператору.

3.6. Диспетчеризация вентиляционных систем

Диспетчеризация вентиляционных установок строится по тому же принципу, что и насосных станций, но набор контролируемых параметров шире и включает специфичные для вентиляции величины: давление в воздуховоде, расход воздуха, температуру в контрольных точках, ток двигателей, состояние вентиляторов (включён, отключён, в аварии) и, что особенно важно для эксплуатации, состояние загрязнённости фильтров. Современные системы дополнительно контролируют качество воздуха по концентрации углекислого газа (CO₂) - датчик CO₂ позволяет регулировать производительность приточной вентиляции не по жёсткому графику, а по реальной потребности помещения, что даёт дополнительную экономию энергии при переменной заполняемости помещений людьми.

3.7. Пример современной вентиляционной установки

Типичная структура автоматизированной приточно-вытяжной вентиляционной установки выглядит так: питание от сети 380 В подаётся через главный автоматический выключатель на два частотных преобразователя - один питает двигатель приточного вентилятора, другой - вытяжного. Оба вентилятора - радиального типа.

Система оснащена датчиком давления в воздуховоде, датчиком температуры в обслуживаемом помещении, датчиком качества воздуха по CO₂ и датчиком загрязнения фильтра. Все сигналы обрабатываются программируемым логическим контроллером, который поддерживает заданное давление, регулирует температуру приточного воздуха и корректирует производительность по уровню CO₂. Оператор взаимодействует с установкой через панель управления, а данные архивируются в SCADA-системе предприятия.

Такая установка обеспечивает автоматическое поддержание давления в воздуховоде, регулирование по качеству воздуха, контроль состояния фильтров и удалённый мониторинг. Экономический эффект от подобной автоматизации складывается из снижения расхода электроэнергии (обычно 30-50% по сравнению с нерегулируемой системой) и повышения комфорта в обслуживаемых помещениях за счёт точного поддержания микроклимата.

Раздел 4. Компрессорные установки

4.1. Назначение компрессорных станций

Компрессорные установки производят сжатый воздух или технический газ, используемые для целого ряда производственных нужд: питания пневматического инструмента (дрелей, гайковёртов, шлифовальных машин), пневмоавтоматики (пневмоцилиндров, клапанов, приводов автоматических линий), технологических процессов - продувки, распыления, транспортировки сыпучих материалов по трубам, окраски пневматическими краскопультами, воздушного охлаждения оборудования, а на некоторых предприятиях - и разделения воздуха на кислород и азот для собственных технологических нужд.

Сжатый воздух часто называют "четвёртым энергоносителем" предприятия после электричества, воды и тепла - настолько широко он используется в современном производстве. При этом производство сжатого воздуха - один из самых энергоёмких процессов на предприятии: КПД преобразования электрической энергии в энергию сжатого воздуха у типичного компрессора не превышает 70-85%, а затем ещё часть энергии сжатого воздуха теряется при транспортировке по трубопроводам из-за утечек в местах соединений и через изношенные уплотнения пневмоинструмента. Именно поэтому вопросам эксплуатации и энергосбережения компрессорных станций на предприятиях уделяется повышенное внимание.

4.2. Классификация компрессоров

Компрессоры делятся, как и насосы, на объёмные (поршневые, винтовые, спиральные) и динамические (центробежные). Таблица 4.1 представляет основные типы с их характеристиками.

Таблица 4.1. Типы промышленных компрессоров

Тип ком-прес-сора	Принцип действия	Производительность	Давление	КПД	Область применения
Поршневой	Сжатие газа поршнем в цилиндре	0,1-100 м³/мин	5-400 бар	60-80%	Малые и средние предприятия, высокое давление, периодическая работа

Винтовой	Сжатие двумя встречно вращающимися винтами-роторами	1-200 м³/мин	5-15 бар	70-85%	Промышленные предприятия, непрерывная работа, среднее давление
Центробежный	Сжатие центробежной силой в рабочем колесе	100-10000 м³/мин	2-20 бар	70-85%	Металлургия, химическая промышленность, нефтегазовая отрасль
Спиральный	Сжатие в двух спиралях, одна из которых неподвижна	0,1-20 м³/мин	5-15 бар	65-80%	Кондиционирование, холодильники, малые компрессоры

Для типичного машиностроительного или деревообрабатывающего предприятия среднего размера основной рабочей лошадкой компрессорной станции служит винтовой компрессор: он даёт непрерывную подачу без пульсаций, работает тише поршневого и служит дольше при сопоставимой стоимости обслуживания. Поршневые компрессоры остаются востребованы там, где требуется высокое давление (сотни бар) - например, для наполнения баллонов - или где станция работает не постоянно, а эпизодически, и более высокая стоимость обслуживания винтового компрессора экономически не оправдана.

В отличие от насосов и вентиляторов, характеристика компрессора (зависимость давления от производительности) у винтовых и поршневых машин относительно плоская - давление в рабочем диапазоне мало зависит от расхода, поэтому регулирование производительности компрессорной станции строится по другому принципу, чем у насосов и вентиляторов, - об этом ниже.

4.3. Электрооборудование компрессорных установок

Компрессорный привод построен по тем же трём принципиальным схемам, что и привод насоса или вентилятора: прямой пуск, устройство плавного пуска и частотный преобразователь. Но одинаковая электрическая схема не означает одинаковые условия эксплуатации. Насос и вентилятор обычно допускают достаточно широкое снижение скорости, тогда как компрессор связан с системой смазки, охлаждения, разгрузки и поддержания герметичности рабочих полостей.

Три схемы пуска

При прямом пуске двигатель компрессора подключается к сети 380 В, 50 Гц через автоматический выключатель, контактор и аппарат защиты от перегрузки. После замыкания контактора двигатель сразу получает полное напряжение и развивает пусковой момент, необходимый для разгона компрессорного механизма.

Прямой пуск применяют для компрессоров небольшой мощности, ориентировочно до 10 кВт. Схема проста, недорога и легко обслуживается, но сопровождается повышенным пусковым током и резким изменением нагрузки на валу. Для поршневого компрессора особенно важно, чтобы перед пуском была предусмотрена разгрузка: запуск при высоком давлении в цилиндре требует большого момента и может привести к срабатыванию защиты двигателя или невозможности разгона.

Устройство плавного пуска устанавливают между аппаратом защиты и двигателем. Оно ограничивает напряжение на статоре с помощью тиристоров и постепенно увеличивает его по заданной рампе. Двигатель набирает скорость плавнее, уменьшается бросок тока, а нагрузка на муфту, ременную передачу, вал и подшипники возрастает без резкого удара.

УПП используют в диапазоне примерно 10-100 кВт, когда прямой пуск создаёт недопустимую просадку напряжения или сильную механическую нагрузку. После разгона устройство часто переводит двигатель на байпасный контактор, поэтому тиристоры не несут рабочий ток постоянно. Устройство плавного пуска облегчает запуск и останов, но не регулирует производительность компрессора в установившемся режиме.

Частотный преобразователь применяют для винтовых компрессоров свыше 15 кВт, когда расход сжатого воздуха меняется в течение смены. Преобразователь регулирует скорость электродвигателя и тем самым изменяет производительность компрессорного блока. Давление в ресивере или магистрали поддерживается по сигналу датчика, а ПИД-регулятор увеличивает или уменьшает частоту вращения в зависимости от отклонения давления от заданной уставки.

При снижении потребления воздуха частотный привод уменьшает обороты, вместо того чтобы постоянно работать на полной мощности с последующим сбросом воздуха через клапан. Если расход возрастает, двигатель ускоряется и производительность компрессора увеличивается. Такой режим особенно полезен для винтовых компрессоров, которые часто работают в промышленной сети с переменным потреблением сжатого воздуха.

Чем компрессор отличается от насоса

В насосе снижение скорости обычно приводит к уменьшению расхода и напора. Для центробежного насоса этот процесс описывается законами подобия, поэтому частотное регулирование может работать в широком диапазоне, если не нарушаются условия охлаждения двигателя и допустимые режимы самого насоса.

У компрессора изменение скорости затрагивает не только подачу, но и внутренние процессы. В винтовом компрессоре необходимо обеспечить достаточное количество масла в зоне винтовой пары, правильный перепад давления в масляном контуре, охлаждение двигателя и нормальное отделение масла от сжатого воздуха. При слишком малой скорости один или несколько из этих процессов нарушаются.

По этой причине не каждый компрессор технически способен работать с частотным преобразователем во всём диапазоне частот. Универсальная настройка «от 0 до 50 Гц» для компрессора недопустима, даже если сам частотный преобразователь такую настройку позволяет. Нижний предел частоты и допустимое время работы на нём должны быть указаны в документации на конкретный компрессорный блок.

Минимальная скорость винтового компрессора

В маслозаполненном винтовом компрессоре масло выполняет одновременно несколько задач: смазывает подшипники и винтовую пару, отводит тепло, уплотняет зазоры между роторами и участвует в регулировании температуры сжатия. При снижении оборотов уменьшаются скорость циркуляции масла и давление, создаваемое самим компрессорным блоком.

Если скорость опускается ниже допустимой, масляный поток может стать недостаточным для нормальной смазки. Возникает масляное голодание, повышается температура подшипников, ухудшается герметизация рабочих полостей, а износ винтовой пары ускоряется. Недостаточное давление в маслоотделителе также ухудшает отделение масла от воздуха, поэтому увеличивается унос масла в пневматическую сеть.

Для многих винтовых компрессоров практический нижний диапазон находится около 25-30 Гц, однако это не универсальная норма. Одни модели рассчитаны

на более широкий диапазон, другие требуют более высокой минимальной скорости. Компрессоры с отдельным масляным насосом могут работать на меньших оборотах, поскольку циркуляция масла меньше зависит от давления нагнетания, но ограничения по охлаждению двигателя, динамике роторов и маслоотделению всё равно сохраняются.

В документации изготовитель может указать минимальную частоту, минимальные обороты в минуту, минимальный перепад давления или минимальное время работы в определённой зоне. Все эти параметры связаны между собой. Поэтому при настройке частотного привода следует смотреть не только на диапазон частот двигателя, но и на карту допустимых режимов компрессорного блока.

Охлаждение и герметичность

На малой скорости двигатель может охлаждаться хуже, особенно если его вентилятор установлен непосредственно на валу. При снижении оборотов уменьшается поток охлаждающего воздуха, а двигатель продолжает развивать момент. В результате допустимый ток на малой скорости может оказаться ниже, чем при номинальной частоте, даже если ток двигателя не превышает паспортное значение.

Винтовой компрессор имеет и собственные тепловые ограничения. Ухудшение циркуляции масла снижает отвод тепла от винтовой пары и подшипников. Температура масла и нагнетания возрастает, что может привести к отключению по перегреву или повреждению уплотнений.

Для компрессоров холодильных установок добавляется другая зависимость: охлаждение электродвигателя может происходить потоком всасываемого хладагента. При чрезмерном снижении скорости уменьшается расход газа, и мотор теряет

способность отводить тепло. В таких машинах нижняя граница частоты определяется одновременно смазкой, охлаждением и допустимыми параметрами холодильного контура.

Герметичность рабочих полостей также зависит от режима. В винтовой паре она обеспечивается геометрией роторов, масляной плёнкой и перепадом давления. Если эти условия нарушаются, производительность снижается, растёт внутренняя утечка, а компрессор может не обеспечить заданное давление даже при увеличении времени работы.

Логика управления

В системе с частотным приводом датчик давления устанавливают в ресивере или в магистрали сжатого воздуха. Его сигнал поступает в ПЛК или во встроенный ПИД-регулятор преобразователя. Регулятор сравнивает фактическое давление с уставкой и задаёт частоту двигателя.

При росте расхода давление в сети снижается. Частотный преобразователь увеличивает обороты, и компрессор подаёт больше воздуха. Когда потребление падает, скорость уменьшается, но только до установленного безопасного минимума. Если давление продолжает расти при минимальной скорости, контроллер может перевести компрессор в режим холостого хода или остановить его с выдержкой времени.

Важна настройка минимального времени работы и минимальной паузы между пусками. Слишком частые переходы «нагрузка-холостой ход-останов» увеличивают количество пусков двигателя, нагружают контакторы и ухудшают тепловой режим компрессора. Поэтому в систему вводят гистерезис по давлению и задержки, не позволяющие реагировать на каждое небольшое колебание в пневматической сети.

ПЛК контролирует не только давление, но и температуру масла, температуру нагнетания, ток двигателя, состояние маслоотделителя, давление масла, готовность преобразователя и наличие разрешения на запуск. Для некоторых компрессоров важен уровень масла в сепараторе и подтверждение работы масляного насоса. Например, система может разрешить запуск только после выполнения условий по уровню масла и температуре.

Что проверяют перед установкой ЧРП

Перед применением частотного преобразователя необходимо проверить документацию производителя компрессора. В ней должны быть указаны допустимый диапазон скорости, минимальная частота, максимальная частота, ограничения по времени работы на малых оборотах, требования к смазке и охлаждению.

Проверяют также совместимость двигателя и преобразователя. Учитывают номинальный ток, способ соединения обмоток, длину кабеля, необходимость выходного дросселя и наличие подшипниковой защиты. Для старых двигателей частотно-регулируемый режим может потребовать дополнительной проверки изоляции и подшипниковых токов.

Необходимо определить, как будет работать система разгрузки. Частотный привод не всегда способен самостоятельно решить проблему высокого давления на нагнетании во время пуска. Компрессор может иметь впускной клапан, золотниковый регулятор, байпас или иной механизм, который переводит его в разгруженное состояние.

Нужно проверить и систему вентиляции компрессорного помещения. Снижение частоты вращения двигателя не отменяет выделение тепла от компрессорного

блока, масла и преобразователя. Если температура помещения превышает допустимую, электронная защита может отключать оборудование даже при нормальном токе.

Типичные ошибки

Одна из распространённых ошибок - установить минимальную частоту по возможностям частотного преобразователя, а не по документации компрессора. Преобразователь способен выдать 10 или 15 Гц, но это не означает, что винтовая пара может безопасно работать на таких оборотах.

Другая ошибка - оценивать режим только по давлению в ресивере. Давление может оставаться нормальным, пока температура масла, нагнетания или подшипников уже приближается к аварийному значению. Поэтому в программе должны учитываться внутренние параметры компрессора, а не только один внешний датчик.

Нельзя без проверки заменять штатный алгоритм разгрузки простым снижением частоты. Для поршневого и винтового компрессора регулирование производительности может выполняться разными способами. В одном случае эффективно изменение скорости, в другом требуется совместная работа частотного привода с клапаном или золотниковым механизмом.

Решение о применении частотно-регулируемого привода на конкретной модели компрессора всегда принимают по технической документации производителя. Общие границы - прямой пуск до 10 кВт, УПП в диапазоне 10-100 кВт и частотное регулирование винтовых компрессоров свыше 15 кВт - можно использовать как предварительный ориентир при выборе концепции. Но окончательный диапазон частот, способ разгрузки и порядок управления определяются не общим правилом, а конструкцией конкретного компрессора.

4.4. Регулирование производительности и каскадное управление компрессорной станцией

Поддержание постоянного давления в воздушной сети реализуется тем же способом, что и в насосных установках: датчик давления в сети передаёт сигнал в ПИД-регулятор, а регулятор изменяет скорость компрессора для удержания заданного давления - типичная уставка для промышленной пневмосети составляет порядка 7 бар с допуском $\pm 0,2$ бар.

На станциях с несколькими компрессорами применяется каскадное управление: "главный" компрессор с частотным регулированием плавно подстраивает производительность под текущее потребление сжатого воздуха, а "ведомые" компрессоры с прямым пуском или УПП подключаются автоматически, когда главный компрессор выходит на максимальную производительность, но расход продолжает расти. Контроллер каскада, как и в насосных станциях, чередует роль "главного" компрессора между агрегатами станции для равномерного распределения износа.

4.5. Защита компрессорных установок

Специфика компрессорного оборудования требует расширенного набора защит по сравнению с насосами и вентиляторами, что объясняется более тяжёлыми условиями работы узлов компрессора - высоким давлением, значительным тепловыделением при сжатии газа и необходимостью надёжной смазки трущихся частей.

Перегрузка двигателя и перегрев контролируются так же, как и на других установках - тепловым реле, автоматическим выключателем, встроенным контролем тока в частотном преобразователе, - но добавляется контроль температуры масла и температуры сжатого воздуха на выходе компрессора: превышение допустимых значений говорит о неполадках в системе смазки или охлаждения и требует немедленной остановки станции.

Низкое давление масла в системе смазки компрессора - отдельная и весьма серьёзная авария, способная за короткое время вывести из строя дорогостоящий винтовой блок компрессора. Защита строится на реле давления масла, которое отключает компрессор при падении давления ниже допустимого уровня.

Высокое давление на выходе компрессора (например, при отказе регулятора или закрытии выходного клапана) контролируется предохранительным клапаном - механическим устройством, стравливающим избыток давления в атмосферу, - и электрическим датчиком давления, дублирующим защиту и отключающим компрессор при превышении уставки.

Обрыв фазы, как и на других установках, выявляется реле контроля фаз или встроенной защитой частотного преобразователя.

4.6. Диспетчеризация и энергосбережение компрессорных станций

Диспетчеризация компрессорной станции строится по общей для всех общепромышленных установок схеме - через SCADA-систему, с визуализацией давления в сети, расхода воздуха, тока двигателей, температуры масла и воздуха, состояния компрессоров и, что специфично именно для компрессорного оборудования, времени работы до очередного технического обслуживания (наработки моточасов).

Экономия электроэнергии за счёт частотного регулирования на компрессорных станциях обычно несколько ниже, чем на насосных и вентиляционных установках, - порядка 20-40%, - что объясняется относительно плоской характеристикой компрессора и упомянутым ограничением по минимальной скорости. Дополнительную экономию (10-20%) даёт оптимизация работы каскада нескольких компрессоров, а также простое снижение рабочего давления в сети: каждый снятый 1 бар избыточного давления экономит примерно 7% электроэнергии компрессорной станции - эта цифра стоит запомнить, поскольку на практике многие предприятия

годами держат в пневмосети давление выше реально необходимого "на всякий случай", теряя на этом заметную долю энергии без какой-либо технологической выгоды.

Раздел 5. Современные тенденции и цифровизация общепромышленных установок

5.1. От ручного управления к интегрированным цифровым системам

Сопоставление устаревших и современных решений по управлению общепромышленными установками наглядно показывает направление развития отрасли за последние два десятилетия. Таблица 5.1 сводит основные различия.

Таблица 5.1. Устаревшие и современные решения в управлении общепромышленными установками

Параметр	Устаревшее решение	Современное решение
Управление насосами	Прямой пуск, регулирование задвижками	Частотное регулирование, автоматическое поддержание параметров
Управление вентиляцией	Включение/выключение вручную, регулирование заслонками	Частотное регулирование по датчикам давления, температуры, CO ₂
Управление компрессорами	Реле давления, прямой пуск	Частотное регулирование, каскадное управление станцией

Учёт электро- энергии	Единый счётчик на вводе предприятия	Почасовой учёт по каждому дви- гателю и установке
Диспетчериза- ция	Периодический обход персо- налом	SCADA-система, удалённый до- ступ через сеть предприятия
Диагностика не- исправностей	По факту отказа оборудования	Прогнозирование по данным мо- ниторинга (предиктивная анали- тика)
Ведение доку- ментации	Бумажные эксплуатационные журналы	Электронный архив данных и от- чётов
Интеграция си- стем	Изолированные автономные системы	Единая платформа управления совместно с MES и ERP предпри- ятия

Ключевое смысловое изменение, стоящее за всеми строками этой таблицы, - переход от реагирования на уже случившуюся неполадку к предупреждению неполадки до её возникновения, и от локального, ручного управления - к централизованному цифровому мониторингу всего вспомогательного хозяйства предприятия одновременно.

5.2. Комплексная диспетчеризация вспомогательного хозяйства предприятия

На крупных предприятиях отдельные системы диспетчеризации насосных, вентиляционных и компрессорных станций, а также холодильных и отопительных установок, обычно объединяются в единую систему диспетчеризации вспомогательного хозяйства. Логика построения такой системы многоуровневая: на нижнем уровне шкафы управления с встроенными ПЛК собирают данные с датчиков и

управляют двигателями конкретных установок, обеспечивая защиту и локальную сигнализацию; данные с этих шкафов передаются по промышленной сети Ethernet на сервер SCADA-системы, где формируется база данных, ведётся архивирование параметров и работает веб-интерфейс для удалённого доступа; на верхнем уровне рабочие места диспетчеров получают визуализацию всего технологического процесса, сигналы аварий и возможность оперативного управления и составления отчётов; наконец, через сеть предприятия к этим же данным при необходимости получают удалённый доступ главный инженер, энергетик или директор предприятия.

Такая многоуровневая архитектура даёт предприятию несколько практических выгод: сокращение численности обслуживающего персонала (по данным практики внедрения - на 30-50%, поскольку постоянное присутствие человека у каждой станции уже не требуется), более раннее выявление зарождающихся проблем благодаря непрерывному мониторингу параметров, оптимизацию режимов работы установок на основе накопленных данных, а также ощутимое снижение простоев оборудования - до 30-50% - за счёт своевременного технического обслуживания вместо аварийного ремонта по факту отказа.

5.3. Энергомониторинг как инструмент управления затратами

Отдельного внимания заслуживает система энергомониторинга - специализированная надстройка над системой автоматизации, задача которой не управление технологическим процессом, а точный учёт и анализ потребления электроэнергии. Счётчики электроэнергии устанавливаются не только на общем вводе предприятия, но и на каждой отдельной установке, а в наиболее детальных системах - на каждом крупном электродвигателе. Данные со счётчиков передаются по промышленным протоколам (Modbus, M-Bus) на сервер энергомониторинга, где формируются графики потребления, выявляются пики нагрузки и участки неэффективной работы оборудования.

Практическая ценность подобной системы для энергетика предприятия велика: почасовой учёт позволяет увидеть, например, что компрессорная станция продолжает работать на полную мощность и в ночную смену, когда реальное потребление сжатого воздуха минимально, или что насосная станция водоснабжения регулярно выходит на пиковую мощность в определённые часы, создавая риск штрафных санкций энергоснабжающей организации за превышение заявленной мощности. Обоснованные данные энергомониторинга также служат весомым аргументом при защите инвестиционных проектов модернизации перед руководством предприятия - когда экономия выражена не общими словами, а конкретными графиками и цифрами за реальный период работы, решение о вложении средств принимается значительно легче.

5.4. Обзор основных мероприятий энергосбережения

Завершая рассмотрение вопросов автоматизации и энергосбережения, стоит свести в единый перечень основные технические мероприятия, применимые практически к любому виду общепромышленных установок, с ориентировочными показателями экономии и срока окупаемости - эти данные пригодятся при разработке программ энергосбережения предприятия и обосновании их эффективности.

Таблица 5.2. Мероприятия энергосбережения на общепромышленных установках

Мероприятие	Ориентировочная экономия	Срок окупаемости
Установка частотных преобразователей на насосы, вентиляторы, компрессоры	30-50% (компрессоры - 20-40%)	1-3 года

Замена двигателей на энергоэффективные (классы IE3, IE4)	5-10% (по частным данным - 3-8%)	1-3 года
Замена освещения на светодиодное	50-70%	1-2 года
Автоматическое отключение оборудования в простое	10-20%	Минимальные вложения
Оптимизация режимов работы (ночной режим, выходные)	15-30%	Минимальные вложения
Снижение избыточного давления в пневмосети	около 7% на каждый снятый 1 бар	Без вложений
Каскадное управление группой установок	10-20%	Средние вложения на автоматику
Рекуперация тепла от компрессоров для отопления	Экономия на теплоснабжении	Индивидуально по объекту
Внедрение энергомониторинга	Выявление резервов 10-20%	1-2 года
Предиктивная аналитика и обслуживание по состоянию	Снижение простоев 30-50%	Индивидуально по объекту

Важно понимать: перечисленные в таблице мероприятия не исключают, а дополняют друг друга. Наибольший суммарный эффект достигается именно при комплексном подходе - когда на предприятии одновременно внедряется частотное регулирование, энергоэффективные двигатели, диспетчеризация и энергомониторинг, а не какое-то одно изолированное решение. Именно такой комплексный подход стал стандартом для проектов модернизации вспомогательного электрохозяйства промышленных предприятий за последнее десятилетие.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличаются общепромышленные установки от электротехнологических с точки зрения их роли в производственном процессе? Приведите примеры того и другого вида оборудования на знакомом вам предприятии или учебной лаборатории.
2. Объясните, почему асинхронный короткозамкнутый двигатель остаётся основным типом электропривода для насосов, вентиляторов и компрессоров, несмотря на существование более сложных типов электрических машин.
3. Опишите различия между прямым пуском, пуском через устройство плавного пуска и пуском через частотный преобразователь. Для каждого способа укажите характерный диапазон мощности и главный недостаток.
4. Что называется рабочей точкой насоса или вентилятора? Как она изменяется при закрытии задвижки (заслонки)?
5. Используя закон подобия лопастных машин, рассчитайте, на сколько процентов снизится потребляемая мощность насоса при снижении частоты вращения на 30%.
6. Перечислите виды защит, обязательных для насосной установки, и объясните физическую причину каждой аварии, от которой защищает соответствующее устройство.
7. Почему на компрессорных станциях, в отличие от насосных и вентиляционных, не всегда можно применить частотное регулирование во всём диапазоне скоростей?
8. Какие нормативные документы регулируют устройство и эксплуатацию электрооборудования насосных, вентиляционных и компрессорных установок? Кратко охарактеризуйте назначение каждого из них.

9. Объясните принцип каскадного управления группой насосов или компрессоров и назовите его основные технические выгоды по сравнению с работой одного крупного агрегата.

10. Какую роль играет система энергомониторинга на предприятии и чем она отличается от системы диспетчеризации технологического процесса?

Практические задания для закрепления материала

Задание 1. Классификация и выбор типа насоса

Цель: научиться подбирать тип насоса под технологическую задачу.

Исходные данные:

Перекачиваемая среда: вода, мазут, химический реагент (малый расход, точное дозирование), вязкая пищевая масса.

Требуемые параметры: расход, напор/давление, режим работы (непрерывный/циклический).

Задание:

Заполните таблицу: для каждой среды укажите тип насоса (центробежный, винтовой, поршневой, шестерённый, вихревой), обоснуйте выбор, укажите типичный диапазон расхода и давления.

Объясните, почему для вязкой среды центробежный насос не подходит.

Критерии:

Правильный выбор типа насоса. Аргументация через принцип действия и свойства среды. Указание характерных диапазонов параметров.

Задание 2. Расчёт экономии от частотного регулирования насоса

Цель: оценить экономический эффект замены дроссельного регулирования на частотное.

Исходные данные:

Насос 55 кВт, работает 24 ч/сут, 365 дней/год.

До модернизации: прямой пуск, регулирование задвижкой.

После модернизации: частотный преобразователь, экономия 40%.

Тариф электроэнергии: 0,10 у.е./кВт·ч.

Стоимость модернизации: 25 000 у.е.

Задание:

Рассчитайте годовое потребление до и после модернизации.

Определите годовую экономию в кВт·ч и в денежном выражении.

Найдите срок окупаемости.

Критерии:

Правильные расчёты по формулам.

Корректный вывод о сроке окупаемости.

Пояснение, почему экономия достигается (кубическая зависимость мощности от скорости).

Задание 3. Анализ схемы пуска двигателя насоса

Цель: выбрать способ пуска и обосновать его.

Исходные данные:

Двигатель насоса: 30 кВт, 380 В, 50 Гц.

Питающая сеть: ограниченная мощность, есть другие чувствительные потребители.

Трубопровод: протяжённый, есть риск гидроудара.

Задание:

Выберите способ пуска: прямой, через УПП, через частотный преобразователь.

Обоснуйте выбор: пусковой ток, гидроудар, стоимость, необходимость регулирования.

Нарисуйте упрощённую силовую схему (сеть — автомат — контактор/УПП/ЧРП — тепловое реле — двигатель).

Критерии:

Обоснованный выбор способа пуска.

Учёт электрических и гидравлических факторов.

Корректная схема.

Задание 4. Настройка контура поддержания давления

Цель: понять работу ПИД-регулятора в системе с частотным преобразователем.

Исходные данные:

Насосная станция: один главный насос с ЧРП, датчик давления 0–10 бар, сигнал 4–20 мА.

Требуемое давление: 4 бар.

Сигнал датчика: 12 мА.

Задание:

Пересчитайте сигнал 12 мА в значение давления (бар).

Объясните, как ПИД-регулятор отреагирует, если давление упало до 3,5 бар: что сделает преобразователь с частотой.

Опишите, что произойдёт, если диапазон датчика в преобразователе задан неверно (например, 0–5 бар вместо 0–10 бар).

Критерии:

Правильный пересчёт сигнала.

Понятное описание реакции контура.

Объяснение последствий ошибки в настройке диапазона.

Задание 5. Защита от сухого хода

Цель: спроектировать простую логику защиты скважинного насоса.

Исходные данные:

Скважинный насос: 7,5 кВт.

Датчики: один поплавковый датчик минимального уровня, один электродный датчик «сухого дна».

Производительность насоса может превышать дебит скважины.

Задание:

Предложите схему управления: при каком условии насос разрешается включать, при каком — отключается.

Добавьте защиту от частых повторных пусков: после отключения по сухому ходу насос не должен включаться, например, 5 минут.

Нарисуйте блок-схему алгоритма (уровень в норме — разрешение пуска; уровень ниже минимума — запрет; отключение — задержка перед повторным пуском).

Критерии:

Логически корректная схема.

Учёт ограничения числа пусков.

Чёткая блок-схема.

Задание 6. Каскадное управление группой насосов

Цель: понять логику работы каскада и чередования насосов.

Исходные данные:

Станция: 3 насоса, один с частотным преобразователем (главный), два с прямым пуском (ведомые).

Уставка давления: 4 бар.

Главный насос достигает 50 Гц, давление падает до 3,8 бар.

Задание:

Опишите последовательность событий: что делает контроллер, когда главный насос выходит на максимум, а давление всё ещё ниже уставки.

Объясните, зачем нужно чередование роли главного насоса между агрегатами.

Предложите простой критерий чередования (по наработке в моточасах или циклически).

Критерии:

Правильное описание каскадного включения.

Понимание задачи равномерного износа.

Конкретный алгоритм чередования.

Задание 7. Анализ мнемосхемы SCADA

Цель: научиться читать диспетчерскую картину насосной/вентиляционной станции.

Исходные данные (описание мнемосхемы):

На экране: 3 насоса (зелёный — работает, серый — остановлен, красный — авария), давление на коллекторе, расход, уровень в резервуаре, токи двигателей, частоты преобразователей.

Состояние: насос 1 — зелёный, 45 Гц, ток 85 А; насос 2 — серый; насос 3 — красный, причина «перегрев»; давление 3,6 бар при уставке 4 бар; уровень в резервуаре — норма.

Задание:

Определите, почему давление ниже уставки, хотя один насос работает.

Предложите действия диспетчера: какие параметры проверить, какую команду отдать.

Объясните, почему нельзя просто включить насос 3, не устранив причину «перегрева».

Критерии:

Верная интерпретация состояния по мнемосхеме.

Логичные действия оператора.

Понимание приоритета защит над командой пуска.

Задание 8. Вентиляция: защита калорифера от замерзания

Цель: усвоить специфику защиты приточной установки.

Исходные данные:

Приточная установка: вентилятор, водяной калорифер, циркуляционный насос малого контура, регулирующий клапан, наружная заслонка.

Зимний режим: наружная температура $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сигналы: датчик температуры обратной воды $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, датчик температуры воздуха после калорифера $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание:

Опишите последовательность действий автоматики при угрозе замерзания: что включается, что отключается, в каком порядке.

Объясните, почему недостаточно просто выключить вентилятор.

Нарисуйте упрощённый алгоритм (снижение температуры → включение насоса → открытие клапана → останов вентилятора → закрытие заслонки).

Критерии:

Правильная последовательность действий.

Понимание роли циркуляции теплоносителя.

Корректный алгоритм.

Задание 9. Сравнение способов регулирования для вентилятора

Цель: сравнить варианты управления производительностью вентиляционной установки.

Исходные данные:

Вентилятор 30 кВт.

Требуется снизить производительность на 30% в ночное время.

Варианты регулирования: дроссельная заслонка, устройство плавного пуска (без изменения скорости в установившемся режиме), частотный преобразователь.

Задание:

Заполните таблицу: для каждого варианта укажите, можно ли получить требуемое снижение производительности, как изменится потребляемая мощность, какие есть ограничения.

Сделайте вывод, какой вариант наиболее экономичен и почему.

Критерии:

Корректное сравнение вариантов.

Учёт кубической зависимости мощности от скорости.

Обоснованный вывод.

Задание 10. Мини-кейс: модернизация насосной станции предприятия

Цель: комплексно применить знания по выбору оборудования, расчёту экономии и организации защиты.

Исходные данные:

Существующая станция: 2 насоса по 45 кВт, прямой пуск, регулирование задвижками.

График водопотребления: днём расход высокий, ночью — в 3 раза ниже.

Задача: снизить потребление электроэнергии, уменьшить число гидроударов, обеспечить автоматическое поддержание давления.

Задание:

Предложите схему модернизации: количество и тип частотных преобразователей, необходимость каскадного управления, состав датчиков.

Оцените ожидаемую экономию (можно принять 30–40% как ориентир) и срок окупаемости при стоимости модернизации 20 000 у.е. и тарифе 0,10 у.е./кВт·ч.

Опишите, какие защиты обязательно должны быть реализованы (сухой ход, перегрузка, перегрев, контроль фаз).

Критерии:

Технически грамотное предложение по схеме.

Реалистичная оценка экономии и окупаемости.

Полный комплект необходимых защит.

Глоссарий модуля

Электрооборудование общепромышленных установок

1. Общие термины

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Общепромышленная установка	Установка вспомогательного назначения	Оборудование, которое обеспечивает работу предприятия, но непосредственно не обрабатывает изделие. К нему относятся насосы, вентиляторы, компрессоры, холодильные и осветительные установки.
Электротехнологическая установка	Электрическая установка технологического назначения	Оборудование, которое непосредственно воздействует на обрабатываемый материал. Примеры: электропечь, сварочный аппарат, электролизная ванна.
Вспомогательное оборудование	Оборудование, обслуживающее основной процесс	Создаёт необходимые условия для работы производства: подаёт воду, воздух, тепло, холод или удаляет загрязнённый воздух.
Технологический процесс	Последовательность операций по изготовлению продукции	Для общепромышленных установок это может быть водоснабжение, охлаждение, отопление, вентиляция или обеспечение производства сжатым воздухом.
Энергоснабжение	Обеспечение потребителей энергией	Включает подачу электрической, тепловой, гидравлической и других видов энергии.
Водоснабжение	Подача воды потребителям	Может использоваться для питьевых, хозяйственных, противопожарных и технологических целей.
Канализация	Система отвода сточных вод	Обеспечивает сбор и удаление бытовых и производственных стоков.
Теплоснабжение	Обеспечение объекта теплом	Включает отопление, подогрев воды и подачу теплоносителя в калориферы.
Холодоснабжение	Обеспечение объекта холодом	Используется для охлаждения оборудования, помещений, воды и технологических сред.
Микроклимат	Совокупность параметров воздуха в помещении	Основные параметры - температура, влажность, скорость движения и состав воздуха.
Пневмоавтоматика	Автоматика, использующая энергию сжатого воздуха	Применяется для управления клапанами, исполнительными механизмами и производственными линиями.
Аспирация	Удаление пыли, стружки и аэрозолей	Обычно применяется непосредственно у станка или другого источника загрязнения.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Дымоудаление	Удаление дыма при пожаре	Специальная вентиляционная система, которая обеспечивает отвод дыма из помещений и путей эвакуации.
Кондиционирование	Поддержание заданных параметров воздуха	Система регулирует температуру, влажность, чистоту и иногда скорость движения воздуха.
Холодильная машина	Установка для отвода тепла	Переносит тепло от охлаждаемого объекта во внешнюю среду.
Чиллер	Холодильная машина для охлаждения жидкости	Обычно охлаждает воду или водный раствор, который затем циркулирует в системе охлаждения.
Фанкойл	Теплообменный аппарат с вентилятором	Используется для отопления или охлаждения воздуха в помещении.
Котёл	Установка для получения горячей воды или пара	Может работать на газе, жидком, твёрдом топливе или электрической энергии.

2. Электропривод и электродвигатели

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Электропривод	Электрическая система приведения механизма в движение	Включает электродвигатель, аппараты управления, защиты и передачи движения рабочему механизму.
Асинхронный двигатель	Двигатель, у которого скорость ротора отличается от синхронной скорости магнитного поля	Наиболее распространённый двигатель насосов, вентиляторов и компрессоров.
Двигатель с короткозамкнутым ротором	Асинхронный двигатель с замкнутой токопроводящей клеткой ротора	Не имеет щёток и контактных колец, поэтому прост, недорог и надёжен.
Ротор	Вращающаяся часть электродвигателя	Передаёт механический момент на вал насоса, вентилятора или компрессора.
Статор	Неподвижная часть электродвигателя	Содержит магнитопровод и обмотки, создающие вращающееся магнитное поле.
Обмотка	Система проводников, размещённых в пазах магнитопровода	В обмотках статора создаётся магнитное поле, а выделяемое тепло зависит от протекающего тока.
Скользющие контакты	Щётки и контактные кольца для передачи тока во вращающуюся часть	В двигателях с короткозамкнутым ротором отсутствуют, что повышает надёжность.
Вал	Вращающаяся механическая деталь	Передаёт крутящий момент от двигателя к рабочему колесу или другому механизму.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Муфта	Соединительный элемент валов	Передаёт вращение от двигателя к насосу или вентилятору и может компенсировать небольшие неточности центровки.
Рабочее колесо	Вращающаяся часть насоса или вентилятора	Передаёт энергию жидкости или воздуху.
Момент на валу	Вращающее механическое усилие	Определяет способность двигателя разгонять и вращать механизм под нагрузкой.
Момент инерции	Способность вращающегося тела сопротивляться изменению скорости	Чем больше момент инерции рабочего колеса, тем дольше длится разгон двигателя.
Номинальная мощность	Мощность, которую двигатель может длительно развивать в установленном режиме	Указывается на паспортной табличке двигателя.
Номинальный ток	Ток двигателя при номинальной нагрузке	Используется при настройке теплового реле и параметров частотного преобразователя.
Номинальное напряжение	Напряжение, на которое рассчитан двигатель	Например, 380 В для трёхфазного промышленного двигателя.
Номинальная частота	Частота питающей сети, для которой предназначен двигатель	В электрических сетях общего назначения обычно составляет 50 Гц.
Трёхфазная сеть	Система электроснабжения с тремя переменными напряжениями	Применяется для питания большинства промышленных электродвигателей.
Класс нагревостойкости изоляции	Допустимая температура изоляционных материалов	Например, класс F рассчитан на нагрев до 155 °С, класс H - до 180 °С.
IP	International Protection, степень защиты оболочки	Код показывает защиту электрооборудования от твёрдых частиц и воды.
IP54	Защита от пыли и брызг	Часто применяется для двигателей в обычных промышленных помещениях.
IP55	Повышенная защита от пыли и струй воды	Используется в помещениях, где оборудование может подвергаться частой мойке.
IP68	Защита от пыли и длительного погружения в воду	Применяется, например, для некоторых погружных насосов.
IM B3	Исполнение двигателя на лапах	Двигатель крепится к основанию с помощью опорных лап.
IM B5	Фланцевое исполнение двигателя	Двигатель крепится к механизму фланцем.
IM B35	Комбинированное исполнение	Двигатель имеет и лапы, и фланец.
IE	International Efficiency, международный класс энергоэффективности	Чем выше класс IE, тем меньше потери энергии при одинаковой полезной мощности.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
КПД	Коэффициент полезного действия	Отношение полезной мощности к потребляемой. Показывает, какая часть энергии преобразуется в полезную работу.
Моторесурс	Ресурс работы двигателя до предельного состояния	Зависит от режима нагрузки, количества пусков, температуры и качества обслуживания.
Тепловая модель двигателя	Расчётная оценка нагрева двигателя по току и времени работы	Используется частотным преобразователем для защиты двигателя от перегрева.

3. Пуск и регулирование

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Прямой пуск	Подключение двигателя непосредственно к сети	Двигатель сразу получает полное напряжение. Схема проста, но сопровождается большим пусковым током.
Пусковой ток	Ток двигателя в момент запуска	У асинхронного двигателя при прямом пуске может превышать номинальный в 5–7 раз.
Бросок тока	Кратковременное резкое увеличение тока	Может вызвать просадку напряжения, нагрев обмоток и срабатывание защиты.
Просадка напряжения	Временное снижение напряжения в сети	Возникает, например, при включении мощного двигателя с большим пусковым током.
УПП	Устройство плавного пуска	Тиристорное устройство, которое постепенно повышает напряжение на двигателе при запуске.
Устройство плавного пуска	Аппарат для мягкого запуска и остановки двигателя	Уменьшает пусковой ток, механический рывок и гидравлический удар, но обычно не регулирует скорость в рабочем режиме.
Тиристор	Полупроводниковый управляемый ключ	В УПП изменяет момент подачи напряжения на двигатель.
Фазовое регулирование	Управление действующим напряжением изменением момента открытия тиристора	Применяется в устройствах плавного пуска.
Рампа разгона	Заданное во времени плавное увеличение напряжения, частоты или скорости	Позволяет двигателю разгоняться без резкого рывка.
Рампа торможения	Плавное снижение напряжения, частоты или скорости	Уменьшает механические нагрузки и гидравлические удары при остановке.
Байпас	Обходной путь для рабочего тока	После разгона двигателя контактор может шунтировать тиристоры УПП, снижая потери и нагрев.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Шунтирование	Подключение параллельного пути для прохождения тока	В УПП рабочий ток после запуска проходит через байпасный контактор.
ЧРП	Частотно-регулируемый привод или частотный преобразователь	Устройство изменяет частоту и напряжение питания двигателя, регулируя скорость вращения.
Частотный преобразователь	Электронный преобразователь частоты и напряжения	Позволяет плавно запускать двигатель, изменять его скорость и поддерживать давление или расход.
Инвертор	Преобразователь постоянного напряжения в переменное	В составе частотного преобразователя формирует трёхфазное напряжение заданной частоты.
Звено постоянного тока	Промежуточная часть частотного преобразователя	В нём выпрямленное напряжение накапливается и затем преобразуется инвертором в переменное.
Регулирование скорости	Изменение частоты вращения двигателя	Для насосов и вентиляторов выполняется преимущественно частотным преобразователем.
Диапазон регулирования	Отношение максимальной скорости к минимальной устойчивой скорости	Например, диапазон 1:100 означает возможность регулировать скорость в сто раз.
Дросселирование	Регулирование расхода за счёт увеличения сопротивления потоку	Выполняется задвижкой или заслонкой, но часть энергии теряется в виде тепла.
Задвижка	Запорный или регулирующий элемент трубопровода	Изменяет проходное сечение и сопротивление движению жидкости.
Заслонка	Регулирующий элемент воздушного канала	Изменяет расход или направление движения воздуха.
Гидравлический удар	Резкий скачок давления в трубопроводе	Возникает при быстром изменении скорости движения жидкости, например при резком запуске или остановке насоса.
Аэродинамическое сопротивление	Сопротивление воздухопроводов движению воздуха	Создаётся трубами, фильтрами, решётками, поворотами и заслонками.
Закон подобия лопастных машин	Связь между скоростью вращения, расходом, напором и мощностью	Приближённо: расход пропорционален скорости, напор - квадрату скорости, мощность - кубу скорости.

4. Насосы и гидравлика

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Насос	Машина для перемещения жидкости	Создаёт расход и давление в трубопроводной системе.
Насосная установка	Насос, привод, трубопроводы, арматура, датчики и автоматика	Представляет собой законченный комплекс для перекачивания жидкости.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Динамический насос	Насос, передающий жидкости энергию движением рабочего органа	К динамическим относятся центробежные и вихревые насосы.
Объёмный насос	Насос, перемещающий жидкость отдельными порциями	К ним относятся поршневые, винтовые и шестерённые насосы.
Центробежный насос	Динамический насос с рабочим колесом	Жидкость перемещается от центра колеса к периферии под действием центробежных сил.
Вихревой насос	Динамический насос с вихревым движением жидкости	Может развивать относительно большой напор при небольшом расходе.
Винтовой насос	Объёмный насос с винтовым ротором	Перемещает жидкость вдоль оси винта. Подходит для вязких сред, мазута, нефти и шлама.
Шнековый насос	Другое название винтового насоса	Использует вращающийся винт, или шнек, для перемещения среды.
Поршневой насос	Объёмный насос с поршнем	Вытесняет жидкость из цилиндра. Может создавать высокое давление и использоваться для дозирования.
Шестерённый насос	Объёмный насос с двумя шестернями	Жидкость переносится в пространствах между зубьями и корпусом.
Многоступенчатый насос	Насос с несколькими рабочими колёсами	Каждая ступень увеличивает давление, поэтому общий напор получается высоким.
Погружной насос	Насос, работающий полностью или частично в жидкости	Жидкость одновременно охлаждает корпус двигателя.
Расход	Объём жидкости, проходящий через систему за единицу времени	Измеряется, например, в м³/ч или л/с.
Напор	Энергия, сообщаемая жидкости насосом, выраженная высотой столба жидкости	Обычно измеряется в метрах водяного столба.
Давление	Сила, действующая на единицу площади	Измеряется в паскалях, барах и других единицах.
Рабочая характеристика насоса	Зависимость напора от расхода	Показывает, какой напор создаёт насос при различных расходах.
Характеристика сети	Зависимость требуемого напора от расхода в трубопроводе	Определяется сопротивлением труб, арматуры, фильтров и высотой подъёма жидкости.
Рабочая точка	Точка пересечения характеристик насоса и сети	Определяет фактические расход и напор в конкретной системе.
Сопротивление сети	Противодействие движению жидкости	Увеличивается при засорении фильтров, закрытии задвижки или уменьшении диаметра прохода.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Всасывающий трубопровод	Участок трубопровода перед насосом	По нему жидкость поступает к насосу.
Напорный трубопровод	Участок трубопровода после насоса	По нему жидкость направляется к потребителям.
Напорный коллектор	Общий трубопровод после нескольких насосов	Объединяет потоки от насосных агрегатов.
Обратный клапан	Клапан, пропускающий поток только в одном направлении	Не допускает обратного движения жидкости после остановки насоса.
Торцевое уплотнение	Уплотнение вращающегося вала	Предотвращает утечку жидкости вдоль вала насоса.
Сухой ход	Работа насоса без жидкости	Приводит к перегреву, разрушению торцевого уплотнения и повреждению подшипников.
Дебит скважины	Максимальный приток воды в скважину за единицу времени	Если насос перекачивает воду быстрее, чем скважина успевает восполняться, возникает сухой ход.
Кавитация	Образование и схлопывание пузырьков пара в жидкости	Возникает при недостаточном давлении на всасывании и может разрушать рабочее колесо.
Гидравлическое сопротивление	Потери энергии при движении жидкости	Возникает из-за трения о стенки труб, местных сопротивлений и запорной арматуры.
Дросселирующая арматура	Арматура для регулирования расхода	Изменяет сопротивление сети с помощью частичного перекрытия прохода.
Теплоноситель	Жидкость или газ, переносящий тепловую энергию	В системах отопления чаще всего используется вода или специальный раствор.

5. Вентиляция и вентиляторы

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Вентиляционная установка	Комплекс оборудования для перемещения и обработки воздуха	Может включать вентилятор, фильтры, калорифер, охладитель, заслонки и автоматику.
Вентилятор	Машина для перемещения воздуха	Создаёт поток воздуха и преодолевает сопротивление воздухопроводов.
Радиальный вентилятор	Центробежный вентилятор	Воздух входит вдоль оси рабочего колеса, а выходит в радиальном направлении. Хорошо работает при большом сопротивлении сети.
Осевой вентилятор	Вентилятор, в котором воздух движется вдоль оси колеса	Используется при большом расходе и сравнительно небольшом давлении.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Диагональный вентилятор	Вентилятор с промежуточным направлением движения воздуха	Сочетает признаки осевого и радиального вентиляторов.
Диаметральный вентилятор	Вентилятор с прохождением воздуха через колесо по диаметру	Применяется в кондиционерах, тепловых завесах и компактных установках.
Воздуховод	Канал для перемещения воздуха	Может быть металлическим, пластиковым или выполненным из других материалов.
Общеобменная вентиляция	Вентиляция всего помещения	Обеспечивает общий воздухообмен.
Местная вытяжная вентиляция	Удаление загрязнений непосредственно от источника	Применяется у станков, сварочных постов, печей и других источников вредных выделений.
Приточная вентиляция	Подача наружного воздуха в помещение	Воздух может очищаться, нагреваться, охлаждаться или увлажняться.
Вытяжная вентиляция	Удаление воздуха из помещения	Удаляет загрязнённый, перегретый или влажный воздух.
Приточно-вытяжная вентиляция	Сочетание подачи и удаления воздуха	Позволяет организовать управляемый воздухообмен.
Фильтр	Элемент очистки воздуха	Задерживает пыль и загрязнения, но по мере загрязнения увеличивает сопротивление сети.
Перепад давления	Разность давлений до и после элемента	По росту перепада на фильтре определяют его загрязнение.
Калорифер	Теплообменник для нагрева воздуха	В водяном калорифере воздух нагревается теплоносителем.
Охладитель	Теплообменник для снижения температуры воздуха	Может использовать охлаждённую воду или хладагент.
Наружная заслонка	Заслонка на входе наружного воздуха	При угрозе заморозки должна закрываться, чтобы прекратить поступление холодного воздуха.
Защита от заморозки	Комплекс мер по защите калорифера	При опасном снижении температуры автоматика включает циркуляцию теплоносителя, открывает клапан и останавливает вентилятор.
Температура обратной воды	Температура теплоносителя после калорифера	Снижение этой температуры может указывать на недостаточную циркуляцию или нехватку тепла.
Предварительный прогрев	Нагрев калорифера до запуска вентилятора	Не позволяет подавать холодный воздух через недостаточно прогретый теплообменник.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Расход воздуха	Объём воздуха, перемещаемый за единицу времени	Измеряется, например, в м³/ч.
Давление в воздуховоде	Давление воздуха в конкретной точке системы	Может использоваться как регулируемый параметр вентилятора.
Качество воздуха	Степень соответствия воздуха заданным требованиям	Оценивается по температуре, влажности, пыли, газам и концентрации CO ₂ .
CO ₂	Диоксид углерода, углекислый газ	Его концентрация может использоваться для регулирования вентиляции по фактической заполненности помещения.
Предварительное проветривание	Работа вентиляции до начала смены	Позволяет заранее привести состав и температуру воздуха к требуемым значениям.
Тепловая завеса	Воздушный поток, отделяющий внутреннюю среду от наружной	Уменьшает поступление холодного воздуха через открытые проёмы.

6. Компрессорные установки

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Компрессор	Машина для сжатия газа	Повышает давление воздуха или другого газа и подаёт его потребителям.
Компрессорная установка	Компрессор, двигатель, система охлаждения, автоматика и трубопроводы	Обеспечивает производство сжатым воздухом или другим сжатым газом.
Компрессорная станция	Комплекс нескольких компрессорных установок	Может включать рабочие, резервные компрессоры, ресиверы, осушители и систему управления.
Сжатый воздух	Воздух, находящийся под давлением выше атмосферного	Используется для пневмоинструмента, приводов и пневмоавтоматики.
Ресивер	Ёмкость для хранения сжатого воздуха	Сглаживает колебания давления и уменьшает число включений компрессора.
Давление сжатого воздуха	Давление воздуха в пневматической сети	Должно соответствовать требованиям подключённых потребителей.
Производительность компрессора	Объём газа, подаваемый компрессором за единицу времени	Определяет, сколько потребителей может одновременно обслуживать установка.
Осушитель воздуха	Оборудование для удаления влаги из сжатого воздуха	Предотвращает коррозию и нарушение работы пневматической аппаратуры.
Маслоотделитель	Устройство для удаления капель масла из сжатого воздуха	Нужен в системах, где качество воздуха имеет значение.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Пневмоинструмент	Инструмент с приводом от сжатого воздуха	Примеры: гайковёрты, шлифовальные машины, отбойные молотки.
Точка росы	Температура, при которой водяной пар начинает конденсироваться	Важный параметр для оценки качества осушенного сжатого воздуха.
Циклический режим	Повторяющаяся последовательность включения и отключения	Характерен для компрессоров, которые поддерживают давление в ресивере.

7. Защита электрооборудования

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Защита электрооборудования	Система аппаратов и алгоритмов отключения аварийных режимов	Предотвращает повреждение двигателя, проводки, насоса, вентилятора и другого оборудования.
Автоматический выключатель	Коммутационный аппарат с автоматическими расцепителями	Защищает линию от короткого замыкания и длительной перегрузки.
Электромагнитный расцепитель	Быстродействующий элемент автоматического выключателя	Отключает цепь при токе короткого замыкания.
Тепловой расцепитель	Элемент автоматического выключателя, реагирующий на нагрев	Отключает цепь при длительной перегрузке.
Контактор	Электромагнитный аппарат для частого включения и отключения нагрузки	В силовой схеме управляет подачей питания на двигатель.
Тепловое реле	Аппарат защиты двигателя от длительной перегрузки	Реагирует на нагрев, связанный с повышенным током, и отключает цепь управления контактором.
Реле контроля фаз	Реле контроля наличия, чередования и перекоса фаз	Отключает двигатель при обрыве фазы, неправильном чередовании или недопустимой асимметрии.
Перекос фаз	Неравенство фазных напряжений или токов	Приводит к росту токов и перегреву трёхфазного двигателя.
Чередование фаз	Порядок следования фаз в трёхфазной сети	Определяет направление вращения асинхронного двигателя.
Обрыв фазы	Исчезновение одной фазы питающей сети	Двигатель может продолжить вращение, но токи в оставшихся фазах резко возрастут.
Короткое замыкание	Непредусмотренное соединение точек с разными потенциалами	Сопровождается очень большим током и требует быстрого отключения.
Перегрузка двигателя	Работа двигателя с нагрузкой выше допустимой	Вызывает увеличение тока и нагрев обмоток.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Перегрев обмоток	Повышение температуры обмоток выше допустимого значения	Может возникнуть из-за перегрузки, плохого охлаждения, высокой температуры помещения или обрыва фазы.
Термистор	Полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от температуры	Встраивается в обмотку двигателя для контроля фактического нагрева.
Термоконтакт	Температурный выключатель	Размыкает или замыкает цепь при достижении заданной температуры.
Заклинивание	Остановка или резкое затруднение вращения механизма	Может быть вызвано посторонним предметом, повреждением подшипника, отложениями или разрушением рабочего колеса.
Электронное реле перегрузки	Электронное устройство контроля тока и нагрузки	Может быстрее обнаруживать блокировку или превышение момента, чем обычное тепловое реле.
Энкодер	Датчик положения или скорости вращения	Передаёт контроллеру импульсы, по которым определяется фактическая скорость вала.
Нет вращения	Аварийное состояние при отсутствии ожидаемого движения	Определяется по энкодеру, датчику скорости или косвенно по току двигателя.
Датчик уровня	Устройство контроля высоты жидкости	Может запрещать работу насоса при низком уровне и предотвращать сухой ход.
Поплавковый датчик	Датчик уровня с плавающим элементом	При изменении уровня поплавков замыкает или размыкает электрический контакт.
Электродный датчик уровня	Датчик, использующий электропроводность жидкости	Определяет наличие жидкости между электродами.
Гидростатический уровнемер	Датчик, измеряющий давление столба жидкости	Позволяет непрерывно определять уровень в резервуаре.
Ультразвуковой уровнемер	Датчик, измеряющий время прохождения ультразвукового сигнала	Определяет расстояние до поверхности жидкости без контакта с ней.
Аварийная блокировка	Условие, запрещающее запуск или продолжающуюся работу оборудования	Сохраняется до устранения опасной причины.
Разрешение пуска	Совокупность условий, при которых оборудование может включиться	Например, нормальный уровень, исправные защиты, правильное положение заслонки и отсутствие аварии.
Повторный пуск	Автоматическое включение после остановки	При сухом ходе или перегреве должен выполняться только после выдержки времени и проверки условий.
Гистерезис	Разность между порогом включения и порогом отключения	Предотвращает частые переключения оборудования при небольших колебаниях параметра.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Дребезг	Частые повторные включения и отключения	Возникает при слишком близких порогах автоматики и ускоряет износ контакторов и двигателей.
Аварийное отключение	Отключение оборудования при опасном режиме	Может выполняться напрямую защитным аппаратом или через ПЛК.
Ручной сброс аварии	Подтверждение аварийного состояния оператором	Требуется проверки оборудования перед повторным запуском.

8. Автоматизация и регулирование

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Автоматизация	Выполнение управления без постоянного участия оператора	Система самостоятельно измеряет параметры, принимает решения и воздействует на оборудование.
ПЛК	Программируемый логический контроллер	Промышленный компьютер для обработки сигналов датчиков, выполнения алгоритмов и управления оборудованием.
Программируемый логический контроллер	Полная расшифровка ПЛК	Выполняет локальную автоматику, блокировки, регулирование и обмен данными.
Локальная автоматика	Управление непосредственно на объекте	Работает рядом с оборудованием и не должна зависеть от внешней диспетчерской системы.
Алгоритм управления	Последовательность условий и действий	Например: при снижении уровня отключить насос, передать аварию оператору и разрешить повторный пуск через 5 минут.
Автоматический режим	Режим, в котором решения принимает программа	Оборудование работает по заданному алгоритму и сигналам датчиков.
Ручной режим	Режим управления командами оператора	Оператор может включать и отключать отдельные механизмы, но защитные блокировки должны сохраняться.
Местный режим	Управление с кнопок или переключателей на шкафу	Применяется при наладке, проверке и техническом обслуживании.
Обратная связь	Передача измеренного параметра в регулятор	Позволяет сравнивать фактическое значение с уставкой и корректировать работу привода.
Контур регулирования	Совокупность датчика, регулятора и исполнительного устройства	Например, датчик давления - ПЛК - частотный преобразователь - насос.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Уставка	Заданное значение регулируемого параметра	Например, давление 4 бар или температура 22 °С.
ПИД-регулятор	Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор	Регулятор изменяет воздействие с учётом текущей ошибки, накопленной ошибки и скорости её изменения.
ПИД-регулирование	Автоматическое поддержание параметра около уставки	Применяется для давления, температуры, расхода и других величин.
Пропорциональная составляющая	Часть регулирования, зависящая от текущей ошибки	Чем больше отклонение от уставки, тем сильнее управляющее воздействие.
Интегральная составляющая	Часть регулирования, учитывающая ошибку за время	Помогает устранить длительное остаточное отклонение.
Дифференциальная составляющая	Часть регулирования, учитывающая скорость изменения ошибки	Позволяет заранее реагировать на быстрое изменение параметра.
Датчик давления	Измерительный преобразователь давления в электрический сигнал	В автоматике часто используется сигнал 4–20 мА.
Датчик температуры	Устройство измерения температуры	Может контролировать воздух, воду, теплоноситель, обмотки или подшипники.
Датчик расхода	Измерительное устройство для определения расхода среды	Передаёт текущее значение расхода и иногда накопленный объём.
Сигнал 4–20 мА	Унифицированный аналоговый токовый сигнал	4 мА соответствует нижней границе диапазона, 20 мА – верхней. Значение ниже 4 мА может указывать на обрыв или неисправность.
Аналоговый сигнал	Сигнал, изменяющийся в диапазоне значений	Используется для передачи давления, температуры, уровня и расхода.
Дискретный сигнал	Сигнал с конечным числом состояний	Обычно передаёт состояния «включено/выключено», «норма/авария».
Импульсный сигнал	Сигнал в виде последовательности импульсов	Может использоваться расходомером или энкодером.
Инженерные единицы	Физические единицы, в которых отображается параметр	Например, бар, °С, м³/ч, %, А или Гц.
Каскадное управление	Последовательное подключение и отключение нескольких агрегатов	Один насос регулирует скорость через ЧРП, а дополнительные насосы подключаются при росте нагрузки.
Главный насос	Насос, выполняющий основное регулирование	Обычно работает через частотный преобразователь и изменяет скорость.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Ведомый насос	Насос, подключаемый дополнительно по команде контроллера	Может работать с прямым пуском или через УПП.
Ротация насосов	Чередование ролей насосов	Не позволяет одному агрегату постоянно работать главным и обеспечивает равномерный износ.
Наработка	Время работы оборудования	Измеряется в моточасах и используется для планирования обслуживания и ротации насосов.
Минимальное время работы	Минимальный период работы после запуска	Не позволяет насосу сразу отключиться после включения.
Минимальная пауза	Минимальное время между отключением и повторным запуском	Защищает двигатель и контактор от частых пусков.
Таймер	Функция отсчёта времени в программе	Используется для задержек включения, отключения и повторного запуска.
Календарный планировщик	Функция управления по времени и расписанию	Позволяет включать вентиляцию до начала смены и снижать производительность ночью.
Блокировка	Условие, препятствующее выполнению команды	Например, низкий уровень воды блокирует запуск насоса.
Приоритет аварийного сигнала	Преимущество защитного действия перед обычной командой	Авария должна отменять расписание или дистанционную команду оператора.

9. SCADA и диспетчеризация

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных	Программно-аппаратная система для наблюдения, архивирования и дистанционного управления объектом.
Диспетчеризация	Централизованное наблюдение и управление оборудованием	Позволяет оператору видеть состояние удалённых установок и анализировать историю их работы.
SCADA-сервер	Серверное оборудование и программа SCADA	Собирает данные, хранит архивы, обрабатывает события и предоставляет информацию рабочим станциям.
Рабочая станция диспетчера	Компьютер оператора	Используется для просмотра мнемосхем, трендов, аварий и передачи команд.
HMI	Human-Machine Interface - интерфейс «человек-машина»	Панель оператора, через которую персонал взаимодействует с локальной системой управления.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Мнемосхема	Графическое представление объекта	Показывает насосы, трубопроводы, датчики, задвижки, значения параметров и аварийные состояния.
Тренд	График изменения параметра во времени	Позволяет анализировать давление, расход, ток, температуру и другие величины.
Архив трендов	Сохранённые значения параметров	Используется для анализа режима работы и поиска постепенного ухудшения состояния оборудования.
Журнал событий	Перечень событий с временными отметками	Фиксирует пуски, остановки, аварии, изменения уставок и действия операторов.
Временная отметка	Дата и время события	Позволяет восстановить последовательность событий после аварии.
Дистанционное управление	Управление удалённым объектом с рабочего места	Оператор может изменить уставку, включить насос или вывести агрегат в резерв, но не должен обходить защиту.
Диспетчерский пункт	Рабочее место или помещение диспетчера	Здесь отображается состояние нескольких насосных станций и других объектов предприятия.
Локальный уровень управления	Уровень управления на самом объекте	Включает ПЛК, шкаф автоматики, датчики и исполнительные механизмы.
Верхний уровень управления	Диспетчерский уровень	Представлен SCADA-сервером и рабочими станциями операторов.
Модуль ввода-вывода	Устройство подключения сигналов к ПЛК	Принимает сигналы датчиков и передаёт команды исполнительным механизмам.
Канал связи	Средство передачи данных между устройствами	Может быть выполнен по Ethernet, оптоволокну, радиоканалу, Wi-Fi, GSM/4G или VPN.
Ethernet	Стандарт локальной компьютерной сети	Используется для обмена данными между ПЛК, SCADA и промышленными устройствами.
Modbus TCP	Промышленный протокол обмена по Ethernet	Применяется для передачи данных между ПЛК, частотными преобразователями и SCADA.
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture	Универсальная архитектура обмена промышленными данными между системами автоматизации.
Оптоволоконная линия	Канал связи по оптическому волокну	Обеспечивает передачу данных на большие расстояния и устойчива к электромагнитным помехам.
GSM/4G-модем	Устройство передачи данных через мобильную сеть	Применяется для связи с удалёнными насосными и вентиляционными установками.
VPN	Virtual Private Network - виртуальная частная сеть	Защищённый канал связи через общую или публичную сеть.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Сегментация сети	Разделение сети на отдельные зоны	Ограничивает распространение неисправностей и повышает защищённость системы управления.
Резервный канал связи	Дополнительный путь передачи данных	Используется при отказе основного канала.
Отказ связи	Потеря обмена данными между устройствами	Не должен приводить к остановке локального управления: ПЛК продолжает выполнять защиту и регулирование.
Разграничение прав доступа	Разделение возможностей пользователей	Один оператор может только наблюдать, другой - изменять уставки, третий - выполнять ответственные операции.
Учётная запись	Идентификатор пользователя в системе	Позволяет установить, кто изменил настройку или подал команду.
История аварий	Сохранившиеся сведения о срабатывании защит	Помогает определить причину остановки и последовательность событий.
Диспетчерский журнал	Журнал действий операторов	Содержит команды, изменения уставок, подтверждения аварий и переключения режимов.

10. Силовые и измерительные элементы станции

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Силовая цепь	Цепь передачи электрической энергии к нагрузке	Включает вводной автомат, контактор или ЧРП, двигатель и защитные аппараты.
Цепь управления	Цепь передачи команд и сигналов	Обычно работает при меньшем напряжении и управляет контакторами, реле и входами ПЛК.
Шкаф управления	Корпус с аппаратами силовой части, управления и защиты	В нём размещаются автоматы, контакторы, ЧРП, ПЛК, источники питания и клеммы.
Главный автомат	Вводной автоматический выключатель станции	Отключает весь объект и защищает вводные кабели от короткого замыкания и перегрузки.
Источник питания 24 В постоянного тока	Источник низкого напряжения для автоматики	Питает ПЛК, датчики, реле и другие цепи управления.
Реактор	Индуктивный элемент в силовой цепи	Может ограничивать токи, снижать гармоники и защищать частотный преобразователь.
Устройство защиты от перенапряжений	Аппарат ограничения опасных импульсов напряжения	Защищает оборудование от переходных процессов и импульсных перенапряжений.
Вентиляция шкафа	Организация отвода тепла из шкафа управления	Особенно важна при установке частотных преобразователей.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Температура шкафа	Температура воздуха внутри шкафа управления	Слишком высокая температура может вызвать перегрев и отключение ЧРП.
Клемма	Точка электрического подключения проводников	Используется для соединения кабелей оборудования, датчиков и аппаратов.
Исполнительный механизм	Устройство, которое выполняет команду автоматики	Например, двигатель, насос, вентилятор, клапан, заслонка или контактор.
Регулирующий клапан	Клапан с изменяемым проходным сечением	Используется для регулирования расхода теплоносителя или другой среды.
Циркуляционный насос	Насос для поддержания движения жидкости по замкнутому контуру	Например, обеспечивает циркуляцию воды через калорифер или систему отопления.
Приёмный резервуар	Ёмкость, из которой насос забирает жидкость	Уровень в нём контролируется для защиты от сухого хода.
Резервный агрегат	Оборудование, готовое заменить рабочее	Включается при отказе основного насоса или вентилятора.
Резервирование	Наличие дополнительных элементов на случай отказа	Повышает надёжность системы, но требует правильного алгоритма переключения.

11. Нормативные и эксплуатационные термины

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
ПУЭ	Правила устройства электроустановок	Устанавливают требования к монтажу, защите, выбору кабелей, заземлению и размещению электрооборудования.
ПТЭЭП	Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей	Определяют порядок эксплуатации, осмотров, обслуживания, ремонта и ведения документации.
Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок	Нормативные требования безопасности при работе с электроустановками	Регламентируют отключение, допуск, применение средств защиты и выполнение работ.
ГОСТ	Государственный стандарт	Нормативный документ, устанавливающий требования к продукции, оборудованию или процессам.
ГОСТ 14254-2015	Стандарт на степени защиты оболочек	Определяет обозначения IP и методы оценки защиты оборудования от пыли и воды.
Паспорт оборудования	Документ с техническими данными изделия	Содержит номинальную мощность, ток, напряжение, частоту, степень защиты и другие параметры.

Термин	Расшифровка или происхождение	Пояснение
Эксплуатационная документация	Комплект документов по работе оборудования	Включает паспорт, инструкции, журналы, графики обслуживания и схемы.
Планово-предупредительный ремонт	Обслуживание и ремонт по заранее установленному графику	Выполняется до возникновения отказа.
Техническое обслуживание	Комплекс операций по поддержанию исправности	Включает осмотр, очистку, подтяжку соединений, проверку защит и измерения.
Ввод в эксплуатацию	Официальное начало использования оборудования	Перед вводом проверяют монтаж, защиту, настройки, направление вращения и работу автоматики.
Наряд-допуск	Письменное разрешение на выполнение опасной работы	Определяет место, содержание работы, меры безопасности и состав бригады.
Средства защиты	Устройства и приспособления для защиты персонала	Включают диэлектрические перчатки, указатели напряжения, ограждения и защитные очки.
Ответственный за электрохозяйство	Специалист, отвечающий за безопасную эксплуатацию электроустановок	Организует обслуживание, ремонт, документацию и соблюдение требований безопасности.
Заземление	Соединение открытых проводящих частей с землей	Снижает опасность поражения электрическим током при повреждении изоляции.
Открытая проводящая часть	Доступная металлическая часть оборудования	В нормальном режиме не находится под напряжением, но может оказаться под ним при повреждении изоляции.

12. Символы и единицы измерения

Обозначение	Значение	Пояснение
Q	Расход	Объем жидкости или газа за единицу времени.
H	Напор или давление	В формулах насосов и вентиляторов характеризует создаваемое давление.
P	Мощность	Потребляемая или полезная мощность оборудования.
n	Частота вращения	Скорость вращения рабочего колеса или вала.
H ₀	Напор при нулевом расходе	Напор насоса при закрытой выходной задвижке.
k	Коэффициент характеристики	Параметр, зависящий от конкретной конструкции насоса или сети.

Обозначение	Значение	Пояснение
В	Вольт	Единица электрического напряжения.
А	Ампер	Единица электрического тока.
Гц	Герц	Единица частоты.
кВт	Киловатт	Единица мощности.
кВт·ч	Киловатт-час	Единица электрической энергии.
м³/ч	Кубический метр в час	Единица объёмного расхода.
л/с	Литр в секунду	Единица объёмного расхода.
бар	Единица давления	1 бар приблизительно равен 100 000 Па.
Па	Паскаль	Единица давления в Международной системе единиц.
м вод. ст.	Метр водяного столба	Единица напора, часто используемая для насосов.
°С	Градус Цельсия	Единица температуры.
%	Процент	Используется для обозначения относительной величины, например скорости или загрузки.
IP54, IP55, IP68	Код степени защиты	Первая цифра показывает защиту от твёрдых частиц, вторая - от воды.
0–10 В	Диапазон аналогового сигнала	Может применяться для задания скорости, давления или другого регулируемого параметра.
4–20 мА	Унифицированный токовый сигнал	Один из наиболее распространённых сигналов промышленной автоматики.

Важные различия

ПЛК и SCADA

ПЛК работает непосредственно с оборудованием: принимает сигналы датчиков, выполняет блокировки, управляет насосами и реагирует на аварии. SCADA отображает информацию, архивирует параметры и позволяет оператору передавать команды. При потере связи со SCADA локальный ПЛК должен продолжать безопасное управление установкой.

Прямой пуск, УПП и ЧРП

Прямой пуск только подключает двигатель к сети и отличается простотой, но создаёт большой пусковой ток. УПП снижает ток и механический удар только во время разгона и торможения. ЧРП дополнительно регулирует скорость двигателя в рабочем режиме, поэтому может поддерживать давление, расход или температуру.

Тепловое реле и термистор

Тепловое реле оценивает перегрузку двигателя по току и времени. Термистор измеряет фактический нагрев обмотки. Эти устройства не полностью заменяют друг друга, поэтому на ответственных установках могут применяться одновременно.

Датчик уровня и защита от сухого хода

Датчик уровня показывает наличие жидкости и запрещает работу насоса при её недостатке. Защита от сухого хода нужна потому, что жидкость одновременно охлаждает насос, уменьшает трение и защищает уплотнения. При отсутствии жидкости насос может быстро выйти из строя.

Уставка и аварийный предел

Уставка используется для обычного регулирования, например поддержания давления 4 бар. Аварийный предел нужен для отключения оборудования при опасном превышении давления. Рабочий регулятор не должен заменять независимую защиту.

Сайт: [Школа для электрика](#)

Канал в Telegram: [Школа для электрика](#)

Явно полезно: [Электронные учебные пособия](#)