

*Пономарев Максим Сергеевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

*Кищенко Роман Валерьевич,
студент направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация
технологических процессов и производств»*

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

***Аннотация:** В статье рассматривается разработка системы автоматического управления насосной установкой на базе программируемого логического контроллера. Предложена функциональная структура, включающая датчики технологических параметров, преобразователь частоты, панель оператора и средства защиты оборудования. Разработан алгоритм последовательного пуска, поддержания давления, останова, аварийной блокировки и переключения на резервный насос. Представлены рекомендации по программной реализации и иллюстративные результаты имитационной проверки, подтверждающие устойчивое поддержание заданного давления при изменении расхода.*

***Ключевые слова:** насосная установка, программируемый логический контроллер, автоматизация, преобразователь частоты, давление, ПИД-регулятор, аварийная защита.*

***Annotation:** The article considers the development of an automatic control system for a pumping unit based on a programmable logic controller. A functional*

architecture is proposed that includes process sensors, a variable-frequency drive, an operator panel and equipment protection devices. An algorithm is developed for sequential start-up, pressure control, normal shutdown, emergency interlocking and changeover to a standby pump. Recommendations for software implementation and illustrative simulation results demonstrate stable pressure maintenance under changing flow demand.

Key words: *pumping unit, programmable logic controller, automation, variable-frequency drive, pressure, PID controller, emergency protection.*

Характеристика объекта и задачи управления

В качестве объекта рассматривается типовая насосная установка, состоящая из рабочего и резервного центробежных насосов, электродвигателей, всасывающего и напорного трубопроводов, запорной арматуры, обратных клапанов и измерительных преобразователей. Основным регулируемым параметром принято давление в напорном коллекторе. Дополнительно контролируются уровень в питающем резервуаре, давление на всасывании, расход, ток электродвигателя и состояние защитных аппаратов.

Система должна обеспечивать местный и дистанционный режимы, автоматический пуск по снижению давления или внешней команде, плавный разгон, стабилизацию давления, контролируемый останов и переход на резервный агрегат. Для исключения неравномерной наработки предусматривается чередование насосов по числу пусков или времени работы. При обслуживании отдельного агрегата его следует исключать из автоматической очереди без нарушения логики остальных устройств.

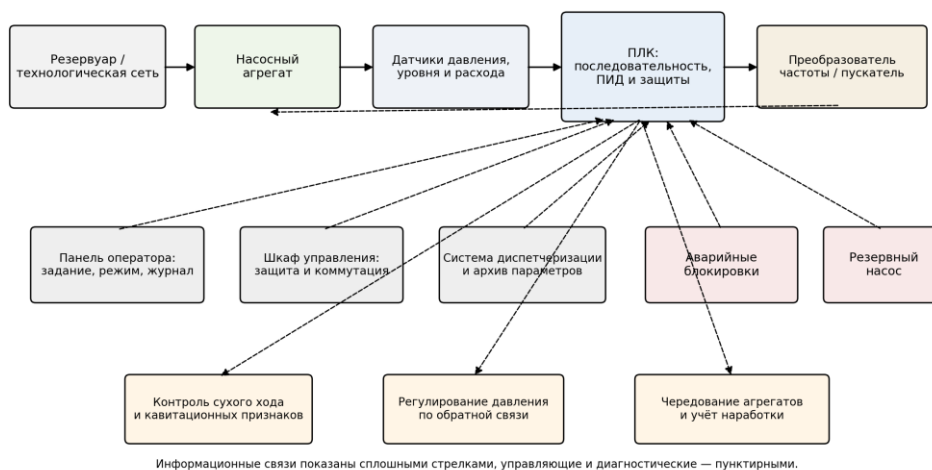
Ключевым требованием является разделение технологического управления и функций безопасности. ПИД-регулятор формирует задание частоты только при наличии общего разрешения на работу. Аварийные блокировки имеют более высокий приоритет и независимо переводят выход управления в безопасное состояние. Такое разделение предотвращает

ситуацию, при которой регулятор пытается компенсировать неисправность датчика или гидравлический отказ увеличением скорости двигателя.

Функциональная структура системы

Функциональная структура включает полевой уровень, уровень управления и операторский уровень. На полевом уровне расположены датчики давления, уровня и расхода, дискретные датчики положения арматуры, тепловая защита двигателя и исполнительные устройства. Контроллер опрашивает входы, выполняет масштабирование аналоговых сигналов, проверяет разрешения, управляет последовательностью и рассчитывает управляющее воздействие.

Преобразователь частоты получает от ПЛК цифровую команду разрешения и задание скорости по аналоговому или сетевому интерфейсу. В обратном направлении передаются фактическая частота, ток, состояние готовности и код неисправности. Панель оператора используется для выбора режима, ввода задания давления, просмотра трендов, квитирования сообщений и вывода агрегата в ремонт. Общая структура показана на рисунке 1.



Информационные связи показаны сплошными стрелками, управляющие и диагностические — пунктирными.

Рисунок 1. Функциональная структура автоматизированной насосной установки

Основные входные и выходные сигналы контроллера

Группа	Сигнал	Тип	Назначение
Аналоговые входы	Давление в напорном коллекторе	4–20 мА	Основная обратная связь ПИД-регулятора
Аналоговые входы	Давление на всасывании	4–20 мА	Контроль условий всасывания и сухого хода
Аналоговые входы	Уровень в резервуаре	4–20 мА / дискретный	Разрешение пуска и защита от опорожнения
Аналоговые входы	Расход	4–20 мА / сеть	Контроль производительности и диагностика
Дискретные входы	Готовность преобразователя частоты	24 В	Разрешение команды пуска
Дискретные входы	Авария двигателя / ПЧ	24 В	Немедленная блокировка агрегата
Дискретные входы	Положение запорной арматуры	24 В	Проверка технологической готовности
Дискретные входы	Местный / дистанционный режим	24 В	Разграничение источников команд
Аналоговые выходы	Задание частоты	0–10 В / 4–20 мА	Управление скоростью электродвигателя
Дискретные выходы	Пуск / разрешение ПЧ	24 В	Включение выбранного насоса
Дискретные выходы	Сигнализация	24 В	Световая и звуковая индикация
Сетевые данные	Параметры, тренды, коды состояния	PROFINET / Modbus	Обмен с ПЧ, HMI и SCADA

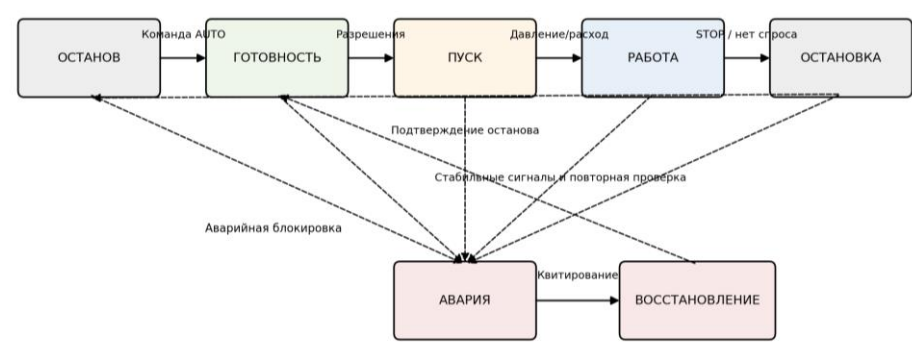
Алгоритм последовательного управления

Управление целесообразно реализовать как конечный автомат состояний. Такой подход делает последовательность наглядной, исключает одновременное выполнение несовместимых действий и упрощает проверку переходов. Для рассматриваемой установки выделены состояния «Останов», «Готовность», «Пуск», «Работа», «Остановка», «Авария» и «Восстановление».

В состоянии «Останов» выходы отключены, а ПЛК контролирует наличие питания, режим управления и исправность входных сигналов. Переход в «Готовность» выполняется после выбора автоматического режима. Затем проверяются уровень, давление на всасывании, положение арматуры, готовность привода, отсутствие аварий и доступность хотя бы одного насоса. Если все условия сохраняются в течение времени подтверждения, выбирается агрегат с меньшей наработкой и начинается пуск.

Последовательность пуска включает выдачу команды разрешения преобразователю частоты, ожидание подтверждения готовности, открытие необходимой арматуры, формирование минимальной частоты и плавный разгон. Переход в состояние «Работа» допускается после появления расхода или достижения минимального давления. Отсутствие ожидаемого технологического эффекта в течение заданного времени рассматривается как неуспешный пуск.

Нормальный останов выполняется снятием задания, замедлением по заданной рампе и последующим отключением разрешения. Резкое снятие питания допускается только при аварийной ситуации, когда продолжение вращения опаснее гидравлического удара. Диаграмма состояний приведена на рисунке 2.



Переходы выполняются только при подтверждении условий в течение заданного времени; аварийный переход имеет наивысший приоритет.

Рисунок 2. Диаграмма состояний алгоритма управления насосной установкой

Таблица 2.

Условия переходов между основными состояниями

Текущее состояние	Условие перехода	Следующее состояние	Основные действия
Останов	Выбран AUTO, отсутствуют блокировки	Готовность	Проверка датчиков, привода и арматуры
Готовность	Есть запрос и все разрешения подтверждены	Пуск	Выбор насоса, выдача команды ПЧ, запуск таймеров
Пуск	Получен расход или минимальное давление	Работа	Передача управления ПИД-регулятору

Пуск	Истёк тайм-аут или возникла блокировка	Авария	Отключение агрегата, фиксация причины
Работа	Исчез запрос или получена команда STOP	Остановка	Плавное снижение частоты
Работа	Критическая неисправность	Авария	Немедленное снятие разрешения, запуск резерва по политике
Остановка	Частота и расход ниже порога	Останов	Сброс команды и сохранение наработки
Авария	Квитирование, причина устранена	Восстановление	Контроль стабильности входных сигналов
Восстановление	Условия стабильны заданное время	Готовность	Разрешение повторного автоматического пуска

Защита от сухого хода должна основываться на нескольких признаках. Основными являются низкий уровень, недостаточное давление на всасывании и отсутствие расхода после пуска. Дополнительными признаками могут быть снижение тока двигателя, нестабильность давления и длительная работа на высокой частоте без достижения задания. Совпадение нескольких признаков повышает достоверность диагностики.

К критическим блокировкам относятся авария преобразователя частоты, срабатывание тепловой защиты, недопустимо высокое давление, потеря достоверного сигнала основного датчика, закрытая арматура и подтверждённый сухой ход. Предупреждениями являются повышенное число пусков, продолжительная работа на предельной частоте, расхождение резервных датчиков и приближение к сроку технического обслуживания.

Для каждого события в журнале следует хранить время, состояние автомата, значения давления, уровня, расхода, частоты и активные разрешения. Такое сохранение контекста значительно упрощает поиск причины остановки. Простая запись «авария насоса» не позволяет отличить электрическую неисправность от нарушения технологических условий.

При наличии резервного агрегата ПЛК может выполнять автоматическое переключение. Сначала неисправный насос переводится в

состояние аварии и исключается из очереди. Затем проверяются условия пуска резерва. Автоматический запуск резервного насоса не должен маскировать общую причину, например пустой резервуар или закрытый общий коллектор; общесистемные блокировки запрещают запуск обоих агрегатов.

Программная реализация на ПЛК

Структуру программы рекомендуется разделить на функциональные блоки. Блок обработки аналогового сигнала выполняет масштабирование, фильтрацию и проверку диапазона. Блок разрешений формирует сводный признак готовности и код первой активной блокировки. Блок выбора агрегата учитывает наработку, статус ремонта и число пусков. Блок последовательности реализует автомат состояний, а отдельный технологический объект ПИД-регулятора формирует задание приводу.

Языки программирования контроллеров и их семантика определены ИЕС 61131-3:2025 [1]. Для последовательной логики удобно использовать диаграммы функциональных блоков, релейно-контактный язык или структурированный текст. Независимо от языка программа должна иметь однозначный приоритет аварий, контролируемые таймеры и явные состояния. Скрытая логика, основанная на множестве взаимных защёлки, затрудняет тестирование и обслуживание.

Регулятор давления должен вызываться с постоянным периодом. Изменение периода расчёта без перенастройки коэффициентов ухудшает динамику. В системах SIMATIC функции ПИД-регулирования реализуются специализированными технологическими объектами, включающими ограничение выхода, ручной режим и средства настройки [4]. Аналогичные функции доступны в контроллерах других производителей.

Для безопасного обслуживания предусматриваются ручной режим и режим ремонта. В ручном режиме оператор управляет отдельным насосом, но критические блокировки остаются активными. Режим ремонта полностью запрещает команды на выбранный агрегат и исключает его из автоматического выбора. Переключение режимов фиксируется в журнале.

Имитационная проверка алгоритма

Для качественной проверки построена упрощённая модель напорного коллектора первого порядка. Частота привода изменялась в диапазоне от 20 до 50 Гц. В ходе моделирования задавались ступенчатые изменения требуемого давления и временное увеличение расхода, рассматриваемое как возмущение. Параметры модели являются иллюстративными и не описывают конкретную промышленную установку.

На начальном участке давление было равно нулю, затем задание последовательно изменялось до 4,0; 5,2 и 4,5 бар. ПИ-регулятор формировал плавное задание частоты без резких переключений. При увеличении расхода давление кратковременно снижалось, после чего контроллер повышал частоту и восстанавливал заданный режим. Результат показан на рисунке 3.

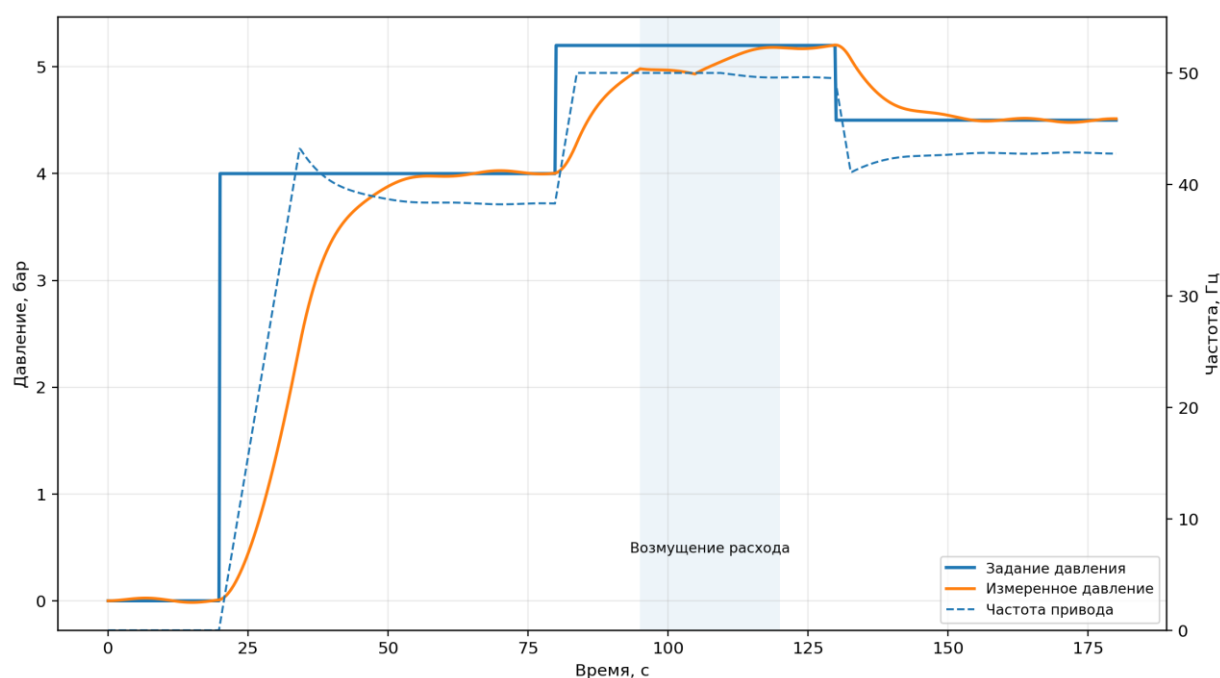


Рисунок 3. Иллюстративная реакция системы на изменение задания и расхода

Таблица 3.

Иллюстративные показатели имитационной проверки

Проверяемый режим	Наблюдаемый результат	Критерий оценки	Вывод
Пуск с нулевого давления	Частота возрастает по рампе, давление достигает 4 бар без резкого скачка	Отсутствие превышения более 5 %	Последовательность пуска работоспособна
Изменение задания 4,0 → 5,2 бар	Регулятор увеличивает частоту и стабилизирует давление	Установившаяся ошибка менее 0,05 бар	Контур сохраняет точность
Рост расхода	Возникает кратковременное снижение давления	Восстановление после окончания возмущения менее чем за 20 с	Возмущение компенсируется
Снижение задания 5,2 → 4,5 бар	Частота плавно уменьшается	Нет колебательного процесса	Рампа и ПИ-закон согласованы
Потеря разрешения	Команда ПЧ снимается, состояние переходит в аварийное	Отключение за один цикл ПЛК	Приоритет защиты обеспечен

Разработана структура автоматизированной системы управления насосной установкой на базе программируемого логического контроллера. В состав системы включены датчики технологических параметров, преобразователь частоты, панель оператора, средства коммутации, сигнализации и резервирования.

Предложен конечный автомат с состояниями останова, готовности, пуска, работы, остановки, аварии и восстановления. Для каждого состояния определены условия переходов и приоритетные действия. Разработан ПИ-алгоритм поддержания давления с ограничением частоты, рампой изменения задания и защитой от интегрального насыщения.

Сформированы защитные функции от сухого хода, недопустимого давления, отсутствия расхода, неисправности привода и потери достоверности измерений. Показано, что автоматическое переключение на резервный насос должно выполняться только после отделения локальной неисправности агрегата от общесистемной блокировки.

Иллюстративная имитационная проверка подтвердила возможность плавного пуска, стабилизации давления и компенсации изменения расхода. Предложенный подход может быть адаптирован к системам водоснабжения, циркуляционным контурам, технологической подаче жидкостей и другим насосным установкам после настройки параметров по данным конкретного объекта.

Использованные источники:

1. IEC 61131-3:2025. Programmable controllers — Part 3: Programming languages [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68533> (дата обращения: 05.08.2026).
2. ISO 9906:2012. Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1, 2 and 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/41202.html> (дата обращения: 05.08.2026).
3. IEC 61800-3:2022. Adjustable speed electrical power drive systems — Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/> (дата обращения: 05.08.2026).
4. Siemens AG. SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control. Function Manual, 11/2025, A5E35300227-AJ [Электронный ресурс]. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/download/108210036/s71500_pid_control_function_manual_en-US_en-US.pdf (дата обращения: 05.08.2026).
5. ABB. Pumps: variable-speed drives, motors and digital solutions for pump applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/applications/pumps> (дата обращения: 05.08.2026).
6. ABB. What is a variable speed drive? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/drives/expertise-technology/what-is-a-variable-speed-drive> (дата обращения: 05.08.2026).

7. IEC 61508-2:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/> (дата обращения: 05.08.2026).

8. ГОСТ 6134-2007. Насосы динамические. Методы испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200060390> (дата обращения: 05.08.2026).

9. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приёмы прикладного проектирования / под ред. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.

10. Михайлов А. К., Малюшенко В. В. Лопастные насосы. Теория, расчёт и конструирование. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.