

Опыт импортозамещения АСУТП непрерывного производства в химической промышленности

Закирзянов Руслан Марселевич, технический директор ООО «НЕКСТ инжиниринг», zg@nexteng.ru
Латыпов Айдар Радикович, начальник отдела АСУТП ООО «НЕКСТ инжиниринг», latypov@nexteng.ru
Шпилёв Алексей Иванович, к.т.н., старший инженер ООО «НЕКСТ инжиниринг», shpilev@nexteng.ru

Аннотация

В условиях санкционных ограничений и необходимости обеспечения технологического суверенитета модернизация АСУТП становится важной задачей для химической промышленности. Особую актуальность приобретает импортозамещение зарубежных решений на российские аналоги. Цель статьи — описать практический опыт перевода АСУТП химического производства на отечественный ПТК, включающий устранение архитектурных недостатков предыдущей системы и повышение производительности.

Ключевые слова: АСУТП, ПЛК, SCADA, импортозамещение, Альфа Платформа, REGUL R500.

Введение

Объект автоматизации, рассматриваемый в рамках проекта, представляет собой две технологические системы по крупнотоннажному производству серной кислоты. Системы с суммарной информационной емкостью порядка 2000 физических сигналов связаны друг с другом единой АСУТП и общим технологическим участком – пусковым подогревателем, необходимым для пуска технологического процесса.

Технологический процесс получения концентрированной серной кислоты на производстве состоит из основных стадий:

- Разгрузка жидкой серы из железнодорожных цистерн или получение жидкой серы из узла плавления, фильтрация жидкой серы;
- Осушка воздуха серной кислотой низкой температуры в сушильной башне;
- Сжигание жидкой серы в атмосфере осушенного воздуха с получением диоксида серы;
- Утилизация тепла от горения серы с получением энергетического пара для ТЭЦ;
- Первая ступень окисления диоксида серы в триоксид на ванадиевом катализаторе (в первых трех слоях контактного аппарата);
- Абсорбция газообразного триоксида в первом моногидратном абсорбере, в процессе которого триоксид поглощается серной кислотой и контактирует с оставшейся в ней водой, повышая концентрацию кислоты;
- Вторая ступень окисления диоксида на четвертом и пятом слоях контактного аппарата для достижения высокой степени окисления и уменьшения содержания диоксида серы в отходящих газах;
- Абсорбция остатков триоксида во втором моногидратном абсорбере;
- Складирование продукции в емкостях и отгрузка.

Особенность процесса заключается в использовании высокочистой жидкой серы, что позволяет вести производство по “короткой схеме” без необходимости фильтрации печного газа от пыли и примесей мышьяка и селена, отрицательно влияющих на катализатор и качество готового продукта. Также процесс примечателен выделением большого количества тепла, которое применяется для генерации электроэнергии.

Предыдущая АСУТП данного объекта была внедрена на предприятии в 2000-х годах и имеет ряд выявленных недостатков:

1. Технологическая зависимость от иностранного производителя ПЛК/SCADA, что приводит к трудностям в технической поддержке, а также в замене и модернизации оборудования в условиях санкционных ограничений.
2. Низкая отказоустойчивость системы. Технологическая сеть, а также часть ПЛК, не имели резервирования, что могло привести к незапланированным остановам производства [1].
3. Наличие узвистостей в ПО. Риски безопасности в случае несанкционированного вторжения в сеть.

В связи с выявленными недостатками, а также необходимостью расширения и импортозамещения производства, компанией «НЕКСТ инжиниринг» была спроектирована и внедрена АСУТП на базе оборудования и ПО отечественного производства (ПЛК REGUL R500 и SCADA «Альфа Платформа»). Выбор программно-аппаратного решения вызван спецификой производства, которая предъявляет следующие требования:

1. Надёжность и отказоустойчивость. Непрерывный цикл производства допускает перерыв не более нескольких минут. Требуется горячее резервирование центральных процессоров, сетевого оборудования и дисковых массивов [2].
2. Минимальное время цикла управления. Для алгоритма антипомпажной защиты нагнетателей и стабилизации теплового баланса необходим гарантированный цикл выполнения программы ПЛК не более 50 мс.
3. Применение открытых промышленных протоколов. Интеграция с действующими устройствами по Modbus TCP [3] и обмен данными с верхним уровнем через OPC UA [4].
4. Модульность и горячая замена. Возможность вывести из работы любой неисправный модуль ввода-вывода или питания без остановки линии.

5. Соответствие требованиям информационной безопасности. Работа под управлением сертифицированных ОС, поддержка ролей пользователей, шифрование трафика OPC UA [4].
6. Унификация и доступность комплектующих. Применение комплектующих отечественного производства и оперативная техническая поддержка на русском языке.
7. Масштабируемость. Обеспечение резерва по вычислительным ресурсам и свободным слотам ввода-вывода для подключения дополнительных сигналов.

Указанные факторы определили выбор решения REGUL R500 + «Альфа Платформа» как оптимального решения, отвечающего одновременно задачам импортозамещения, повышения надёжности и дальнейшего развития цифровой инфраструктуры предприятия. Данное решение относится к классу ПЛК+SCADA.

Проектирование

Техническое задание на создание системы формировалось совместно с заказчиком при участии технических специалистов производителей оборудования. Важной задачей проекта являлась реализация схожего с предыдущей системой графического интерфейса и алгоритмов управления без потери существующего функционала с повышением надёжности и удобства для оператора.

Основная сложность, с которой пришлось столкнуться, заключалась в неполноте исходных данных, которые удалось уточнить путем реверс-инжиниринга предоставленного заказчиком прикладного ПО АСУТП. Для выполнения данной задачи был организован выезд сотрудников компании для проведения обследования и выгрузки существующего ПО. При помощи предварительного анализа существующего ПО техническими специалистами компании были актуализированы перечень входных-выходных сигналов, технологических защит, шкал и уставок датчиков; уточнены внешние виды мнемосхем и сформировано представление о структуре и принципах работы алгоритмов. Благодаря полученной из ПО информации удалось избежать ошибок в алгоритмах и проектной документации, а также существенно сократить срок разработки сложных алгоритмов пускового подогревателя и технологических топков.

В соответствии со структурой, представленной на рисунке 1, заменяемая АСУТП состояла из семи нерезервированных и одного резервированного ПЛК, инженерной станции, восьми клиентов и резервированного сервера ввода-вывода для передачи данных в MES. Сетевые коммутаторы системы объединены в кольцо, при этом технологическая сеть не дублируется, а каждый клиент подключается к ПЛК напрямую и хранит исторические данные локально.

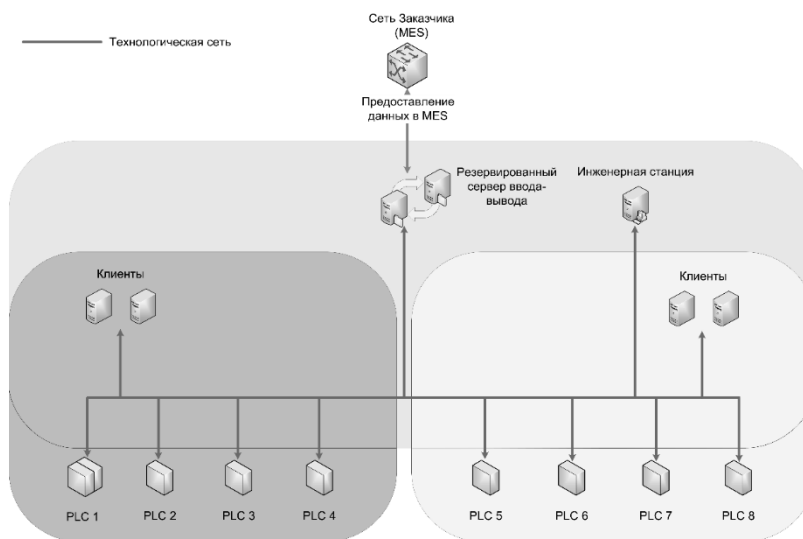


Рисунок 1. Исходная структура системы.

С целью повышения надёжности системы была предложена клиент-серверная архитектура (рисунок 2) с горячим резервированием наиболее ответственных узлов:

1. Три резервированных сервера ввода-вывода. Осуществляют сбор данных с ПЛК и передачу данных операторским и историческим станциям.
2. Резервированный исторический сервер. Осуществляет сбор и хранение данных, полученных с серверов ввода-вывода.
3. Четыре резервированных ПЛК. Предназначены для сбора информации с датчиков и управления полевым оборудованием.

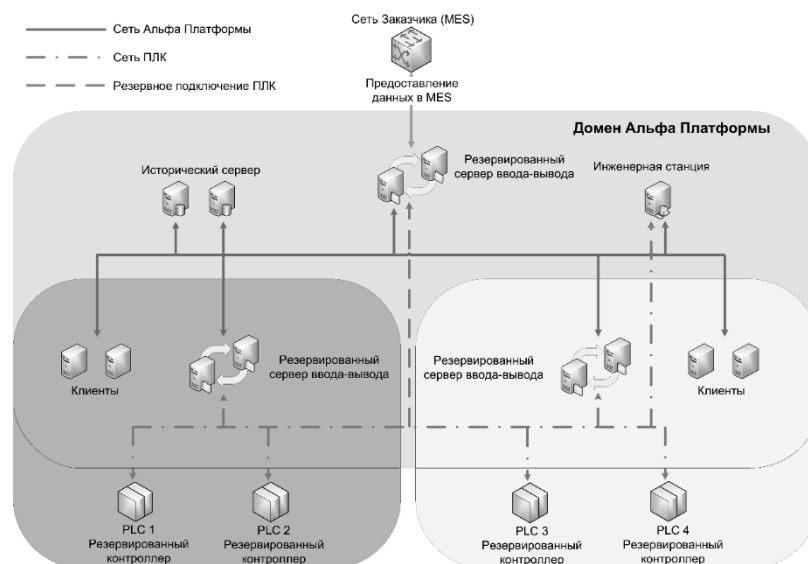


Рисунок 2. Структура предложенной системы.

Элементы системы объединены в две независимые локальные вычислительные сети. Дополнительно предусмотрен функционал опроса ПЛК со стороны центрального сервера ввода-вывода (при отказе промежуточного сервера). Коммутаторы системы для повышения надежности связи объединены в кольцо. Дисковые пространства клиентов, серверов ввода-вывода и исторических станций объединены в отказоустойчивые массивы RAID 1, RAID 1 и RAID 10 соответственно.

Разработка прикладного ПО

Ввиду производственной необходимости заказчиком было принято решение реализовать проект в два этапа без полного останова обеих систем. Таким образом, предполагалось внедрение АСУТП первой технологической системы без останова второй с последующим переключением. Разработка прикладного ПО велась также в два этапа. Для организации параллельной разработки был организован ручной контроль версий с ежедневным резервным копированием и слиянием файлов проекта. Для удобства обслуживания и читаемости проектов ПЛК были применены следующие решения:

1. Наглядная архитектура проекта. Дерево проекта (рисунок 3) представляет собой набор папок с ROU (программная единица) [5]. ROU может содержать: группы ФБ (функциональных блоков) обработки каналов (в одной ROU содержатся ФБ всех каналов одного модуля); алгоритмы механизмов, включая блокировки (1 ROU – 1 технологическая позиция); программу диагностики; объявленный резерв ФБ для обеспечения онлайн-загрузки в ПЛК.

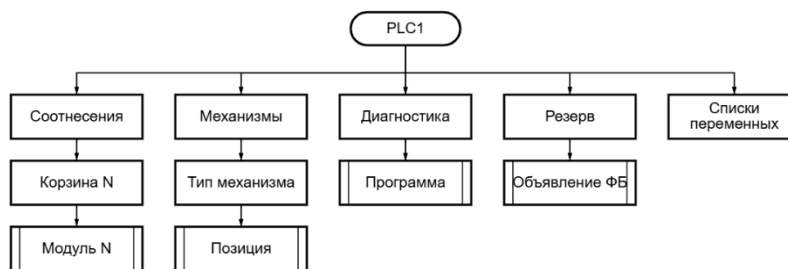


Рисунок 3. Дерево проекта ПЛК.

2. Использование пользовательских структур и библиотек функциональных блоков (на языках ST и SFC). Пользовательские структуры значительно ускоряют процесс разработки и дальнейшего обслуживания, т. к. один экземпляр представляет собой полный набор входных или выходных данных алгоритма. К примеру, вместо объявления в списке переменных 13-ти параметров и установления 13-ти зависимостей с блоком обработки аналогового сигнала достаточно объявить один экземпляр структуры и одну зависимость. Применение библиотек позволяет вносить изменения централизованно для всех проектов ПЛК, что снижает вероятность ошибок, связанных с контролем версий ФБ. Так, для изменения алгоритмов группы механизмов (насосов, клапанов и т.д.) достаточно изменить их ФБ в библиотеке, а изменения в проекте будут применены автоматически.
3. Применение команд, влияющих на генерацию кода компилятором (прагм). При разработке применялись прагмы, позволяющие автоматически отметить переменную для резервирования, исключить вывод определенных предупреждений, вывести текст в журнал компиляции, автоматически добавить переменную в символьную конфигурацию. Это позволило ускорить процесс разработки и снизить вероятность ошибок.
4. Доработка протокола межконтроллерного обмена. Доработка заключалась в организации резервированного канала передачи данных между контроллерами путем применения двух драйверов

сетевого обмена и дополнительной диагностики связи при помощи heartbeat-сообщений, что повысило надежность системы.

Особое внимание при разработке было уделено алгоритмам антипомпажной защиты нагнетателей (АПЗ) и технологических топков, которые разрабатывались совместно с заказчиком по исходным данным в виде существующего ПО и технологического регламента. Алгоритм АПЗ – критически важное средство предотвращения помпажа в нагнетателях, обеспечивающее безопасность, энергоэффективность и долговечность оборудования путем динамического контроля давления и управления режимами его работы. Работа алгоритма предъявляет высокие требования к надежности и времени реакции системы (не более 50 мс). Алгоритм работы технологических топков является не менее важным, т.к. пусковой подогреватель (общий для двух систем), а также циклонные топки (по одной на систему) являются критическими узлами, отказ которых приведет к останову одной или двух систем. Реализованный алгоритм осуществляет управление топками на всех режимах работы, включая этапы вентиляции, опрессовки, подготовки к розжигу и розжига топки.

Также при разработке алгоритмов регулирования были применены следующие законы управления:

$$u(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad \text{– для аналоговых регуляторов;}$$

$$u(t) = \frac{d}{dt} \left(K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon(t) dt \right) \quad \text{– для трехпозиционных регуляторов,}$$

где $u(t)$ – закон управления; $\varepsilon(t)$ – рассогласование; K_p – коэффициент пропорциональности, T_i, T_d – постоянные времени интегрирования и дифференцирования. Применяемые формы законов отличны от тех, которые применялись в старой системе, так как при разработке прикладного ПО были применены разработанные ранее и применяемые в других проектах ФБ регуляторы. В связи с этим, для адаптации коэффициентов регуляторов были выведены выражения для пересчета существующих значений [6]. Для аналоговых регуляторов результат вычисления закона управления после нормирования в сигнал постоянного тока 4-20 мА подается непосредственно на исполнительный механизм – частотный преобразователь двигателя или клапан с пневматическим позиционером. Для трехпозиционных регуляторов алгоритм выглядит иначе: в начале алгоритма вычисляется разница времени между значением времени работы программы, зафиксированным в предыдущем цикле программы, и значением времени в текущем цикле. Если значение превышает время цикла пересчета регулятора (интервал, через который происходит пересчет управляющего воздействия по закону регулирования), то осуществляется расчет требуемой величины длительности импульса на открытие/закрытие регулятора с ограничением минимального времени импульса. При положительной величине рассогласования управляющее воздействие на регулятор будет со знаком «+», а иначе со знаком «-». В зависимости от знака управляющего воздействия происходит подача сигнала на дискретный выходной канал открыть или закрыть. На рисунке 4 изображен график изменения следующих параметров: заданное значение уровня конденсата в емкости (темно-серый), текущее значение конденсата в емкости (серый), степень открытия клапана (черный).

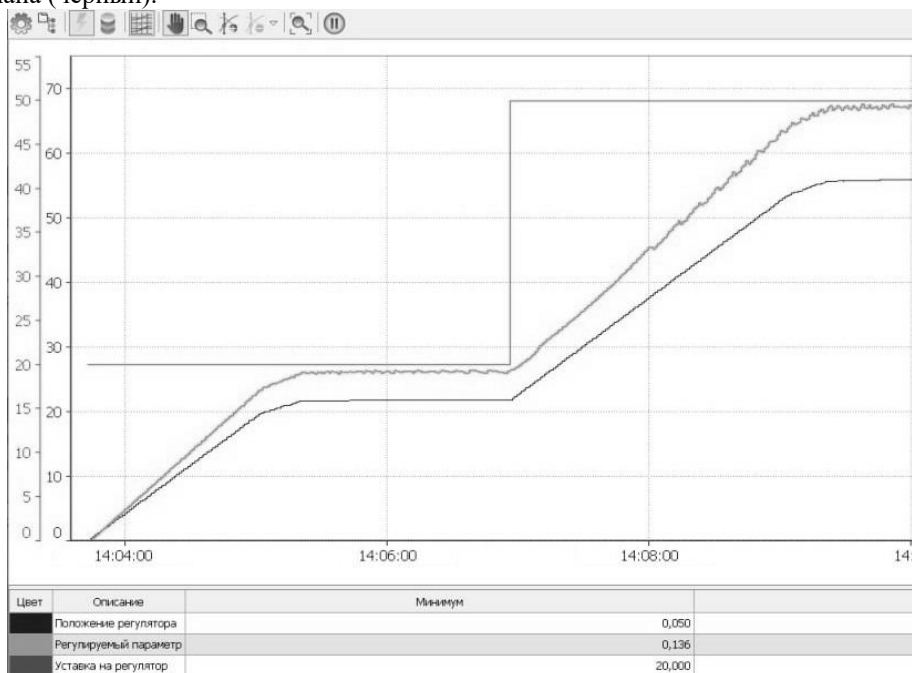


Рисунок 4. Тренд трехпозиционного регулятора

Внедрение системы проходило в два этапа с поочередным остановом каждой из систем. На первом этапе было произведено разделение технологических сетей с последующим выключением части оборудования, применяемого для управления первой системой. Работы велись по детальному плану, включающему отключение полевых кабелей, демонтаж и монтаж шкафов АСУТП, подключение полевых, межшкафных и сетевых кабелей, пусконаладочные работы, комплексное опробование системы и обучение персонала. За 36 дней был выполнен весь запланированный объем работ и система была успешно введена в эксплуатацию.

Применение существующих коэффициентов регуляторов в качестве начальных, а также предварительная подготовка мультитрендов для наглядной настройки позволили ускорить процесс подбора коэффициентов контуров регулирования методом Циглера-Никольса [7]. На этапе наладки не раз возникала необходимость в сбросе программы ПЛК, в связи с чем полезным инструментом стал менеджер рецептов, который позволил сохранять и восстанавливать значения энергонезависимых переменных, содержащих коэффициенты регуляторов, шкалы и уставки аналоговых параметров и т.д.

Ввиду переработки технологической схемы (появилась необходимость в работе одного из нагнетателей на обе системы) и отсутствия возможности подключения клиента к двум резервированным парам серверов была скорректирована схема обмена данными: один из клиентов первой системы подключался напрямую к центральному серверу ввода-вывода для просмотра данных по обеим системам. В соответствии с изменениями архитектура системы в Alpha.DevStudio выглядит следующим образом (рисунок 5):

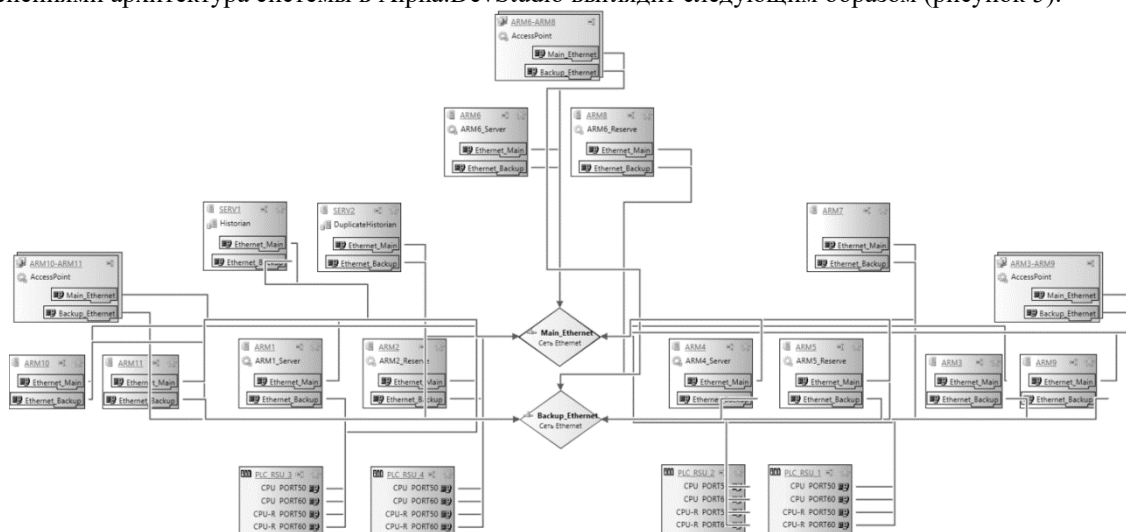


Рисунок 5. Архитектура в Alpha.DevStudio.

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:

PLC_RSU_3, PLC_RSU_4 – ПЛК первой системы;

PLC_RSU_1, PLC_RSU_2 – ПЛК второй системы;

ARM1, ARM2 – резервированный сервер ввода-вывода первой системы;

ARM4, ARM5 – резервированный сервер ввода-вывода второй системы;

ARM6, ARM8 – центральный резервированный сервер ввода-вывода;

SERV1, SERV2 – исторические серверы;

ARM10, ARM11 – клиенты первой системы;

ARM3, ARM7, ARM9 – клиенты второй системы.

Вторая система была остановлена спустя две недели после пуска первого этапа. Длительность второго этапа оказалась на четыре дня больше по сравнению с первым. Отклонение от графика было вызвано отсутствием резерва длины некоторых существующих кабелей, в связи с чем потребовалось оперативно выработать и согласовывать с технологическим персоналом заказчика технические решения (редактировать таблицы подключений, устанавливать дополнительные клеммные сборки и т.д.).

Результаты внедрения

Реализация проекта по импортозамещению АСУТП позволила устранить зависимость от иностранного оборудования и одновременно решить проблемы, имевшиеся в предыдущей системе. К моменту сдачи обеих систем были достигнуты следующие результаты:

1. Суммарная суточная производительность двух систем по данным заказчика возросла на 22%;
2. По данным журнала событий за счёт горячего резервирования ПЛК, серверов ввода-вывода, исторических серверов и сетевых колец снизилось количество внеплановых остановов;
3. Увеличена отказоустойчивость и время восстановления системы: дублирование сетей, RAID-массивы и резервные каналы межконтроллерного обмена обеспечивают отказоустойчивость без потери данных [8];
4. Переход на открытые протоколы (Modbus TCP, OPC UA) и отечественные комплектующие упростил дальнейшее масштабирование и обслуживание системы;

5. Внедрение проходило без полной остановки производства: первая линия запущена за 36 дней, вторая – за 40 дней, что подтвердило эффективность поэтапной стратегии внедрения.

Таким образом, проект показал, что в результате импортозамещения имеется возможность не только повторить функциональность иностранных систем, но и, по данным, предоставленным заказчиком, получить прирост производительности после модернизации при одновременном снижении операционных рисков.

В дальнейшем в новую АСУТП сотрудниками компании был интегрирован узел плавления и фильтрации твердой серы, также построенный на отечественном ПЛК. Информационная емкость узла составила 300 сигналов. Верхний уровень АСУТП данного узла представляет собой 1 инженерную станцию и 2 АРМ оператора (SCADA “Альфа Платформа”). Новый узел позволил увеличить подачу сырья на все технологические системы производства на 70 т/ч.

На основании опыта внедрения сформулированы следующие рекомендации:

1. Обеспечивать разработку максимально полного технического задания. Неполные исходные данные неизбежно приведут к задержкам и сложностям в процессе выполнения работ. При модернизации существующей системы рекомендуется предусмотреть дополнительное время на реверс-инжиниринг и актуализацию исходных данных.
2. Предусматривать горячее резервирование всех критичных узлов, включая сеть АСУТП, и свободные слоты для установки модулей ввода-вывода, что позволит выдержать отказ критичных элементов системы без остановки технологического процесса.
3. Использовать модульную структуру проекта ПЛК, применять централизованные библиотеки. Чёткая иерархия проекта, пользовательские структуры данных и единая библиотека ускоряют отладку и минимизируют ошибки при обновлениях программного обеспечения.
4. Использовать систему контроля версий и регулярное резервное копирование. Параллельная работа нескольких инженеров и поэтапный ввод в эксплуатацию требуют особого внимания к контролю версий и резервным копиям программного обеспечения.
5. Применять инструменты для быстрой настройки и восстановления параметров. Менеджер рецептов и предварительно настроенные мультитренды существенно ускоряют наладку контуров регулирования и восстановление настроек при откате версии ПО, что критически важно при сжатых сроках пуска наладочных работ.

Следование перечисленным рекомендациям позволит воспроизвести положительный эффект проекта на других непрерывных производствах разных отраслей промышленности.

Список литературы

1. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическими процессами, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2013. — 606 с.
2. Ицкович Э.Л. Особенности современных АСУТП. М.: ИПУ РАН, 2017. — 523 с.
3. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. — 2012. — 68 стр.
4. OPC Foundation. OPC Unified Architecture Specification. Part 1: Overview and Concepts. Version 1.04. — 2021. — 134 стр.
5. ГОСТ Р МЭК 61131-3—2017. Программируемые контроллеры. Часть 3. Языки программирования. — Введ. 2019-07-01. — М.: Стандартинформ, 2019. — 436 с.
6. Ицкович Э.Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // Автоматизация в промышленности. – №6. – 2007. – с.39-44
7. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003.
8. Федоров Ю.Н. Основы построения АСУТП взрывоопасных производств. В 2-х тт. Т.1: "Методология". Т.2: "Проектирование". Т.1-2. 2006. – 1352 с.