

ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫБОРА АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ АСУТП ЧЕРЕЗ ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Р.М. Закирзянов¹

¹ ООО «НЕКСТ инженеринг»,
Россия, Казань, zr@nexteng.ru

Аннотация. Рассматривается задача выбора оптимальной архитектуры распределенной автоматизированной системы управления технологическими процессами крупных предприятий химической отрасли в условиях неполноты данных об объекте управления. Предлагается метод верификации и сравнения различных архитектур АСУТП через построение цифрового двойника объекта управления. В качестве примера приведено построение модели узла абсорбции производства серной кислоты. Выбранная аппаратная архитектура учитывается в модели как канал связи между объектом управления и регулятором. Предложены метрики для сравнительного анализа архитектур АСУТП и выбора наиболее подходящего варианта.

Ключевые слова: распределенная система управления, структурная оптимизация, цифровой двойник.

DIGITAL TWIN-BASED VERIFICATION OF HARDWARE ARCHITECTURE SELECTION FOR AN INDUSTRIAL PROCESS CONTROL SYSTEM IN A CHEMICAL PROCESS PLANT

R.M. Zakirzyanov¹

¹ NEXT engineering, LLC,
Russia, Kazan, zr@nexteng.ru

Abstract. This article addresses the problem of selecting an optimal hardware architecture for a distributed industrial process control system in large chemical plants under conditions of incomplete information about the controlled process. A method for the verification and comparison of alternative control system architectures based on the construction of a digital twin of the process is proposed. As a case study, a model of an absorption unit in a sulfuric acid production plant is developed. The selected hardware architecture is represented in the model as a communication channel between the process and the controller. A set of metrics for the comparative evaluation of control system architectures and the selection of the most suitable option is proposed.

Keywords: distributed control system, structural optimization, digital twin.

Современные промышленные предприятия характеризуются высоким уровнем автоматизации. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) решают задачи обеспечения качества продукции, безопасности людей и окружающей среды, а также снижения себестоимости продукции. Современные АСУТП строятся, как правило, на базе программно-технических комплексов. Примерами таких комплексов могут быть распределенные системы управления (PCY) или системы, построенные на базе ПЛК и SCADA.

В последние годы развиваются открытые технологии АСУТП такие как OPAS или «Открытая АСУТП» [1], которые позволяют интегрировать в единую систему оборудование различных производителей, обеспечивая при этом интероперабельность и кросс-платформенность. С учетом этого задача выбора оптимальной архитектуры программно-технического комплекса АСУТП приобретает высокую важность.

Одновременно с этим существенно возрастает сложность проектирования аппаратной архитектуры АСУТП. Под аппаратной архитектурой в данной работе понимается структура размещения контроллеров, серверов, модулей ввода-вывода, сетевого оборудования и каналов связи между ними. Как правило, архитектура АСУТП

имеет иерархическую структуру и включает полевой уровень, уровень локального управления и верхний уровень диспетчеризации и архивирования.

Задачи структурной оптимизации технических систем получили в последние годы широкое распространение [2]. Метод построения оптимальной структуры АСУТП детально рассмотрен в [3], [4]. Задача решается как задача комбинаторной оптимизации с множественными ограничениями с применением метаэвристического алгоритма. Подробное описание метаэвристических алгоритмов оптимизации дано в [5]. Как правило, выбор структуры (в данной статье принят термин «архитектура») АСУТП производится на основании опыта проектировщика и рекомендаций производителей оборудования и зачастую не является оптимальным по таким критериям, как стоимость, надежность (вероятность отказа) и время обработки сигнала.

Однако существующие методы структурной оптимизации программно-технических комплексов, как правило, не учитывают влияние архитектуры на качество управления динамическими объектами. Между тем задержки передачи данных, джиттер, периодичность опроса и потери пакетов способны существенно влиять на устойчивость и качество регулирования, особенно для быстропротекающих процессов. Для медленных химико-технологических процессов влияние сетевой инфраструктуры может быть незначительным. Однако при наличии быстрых контуров регулирования неправильный выбор архитектуры способен привести к увеличению времени регулирования, росту перерегулирования и даже потере устойчивости системы.

Целью работы является исследование влияния аппаратной архитектуры АСУТП на динамику системы управления на основе идентифицированной модели реального объекта.

Таким образом, возникает задача верификации архитектуры АСУТП с учетом динамики реального объекта управления. Аппаратная архитектура рассматривается как часть модели системы управления и представляется в виде каналов связи между объектом управления и регулятором. Это позволяет выполнять сравнение различных вариантов структуры АСУТП еще на ранних этапах проектирования.

В данной статье проблема верификации структуры АСУТП рассматривается на примере установки производства серной кислоты химического комбината. Выбор обусловлен высокой ответственностью узла и наличием контуров управления с различной динамикой. Производство серной кислоты является одним из наиболее распространенных крупнотоннажных химических производств. Серная кислота широко применяется при производстве минеральных удобрений, в металлургии, нефтепереработке, органическом синтезе, производстве красителей, взрывчатых веществ и других технологических процессах. Кислота производится контактным способом [6].



Производство делится на три стадии: сжигание серы (1), каталитическое окисление диоксида серы (2), абсорбция триоксида серы серной кислотой (3). Для управления технологическим процессом производства серной кислоты применяется АСУТП. Рассматриваемая в данной статье задача решалась в рамках перевода отслужившей назначенный срок службы АСУТП зарубежного производства на доверенный программно-аппаратный комплекс (ПАК) в рамках постановления

правительства РФ №1912 от 14.11.2023 г. [7]. Количество параметров контроля и управления – 1063.

В ходе предварительной подготовки с использованием разработанного программного обеспечения [3] получены две альтернативные аппаратные архитектуры АСУТП: распределенная и централизованная. Архитектуры схематично показаны на рисунке 1.

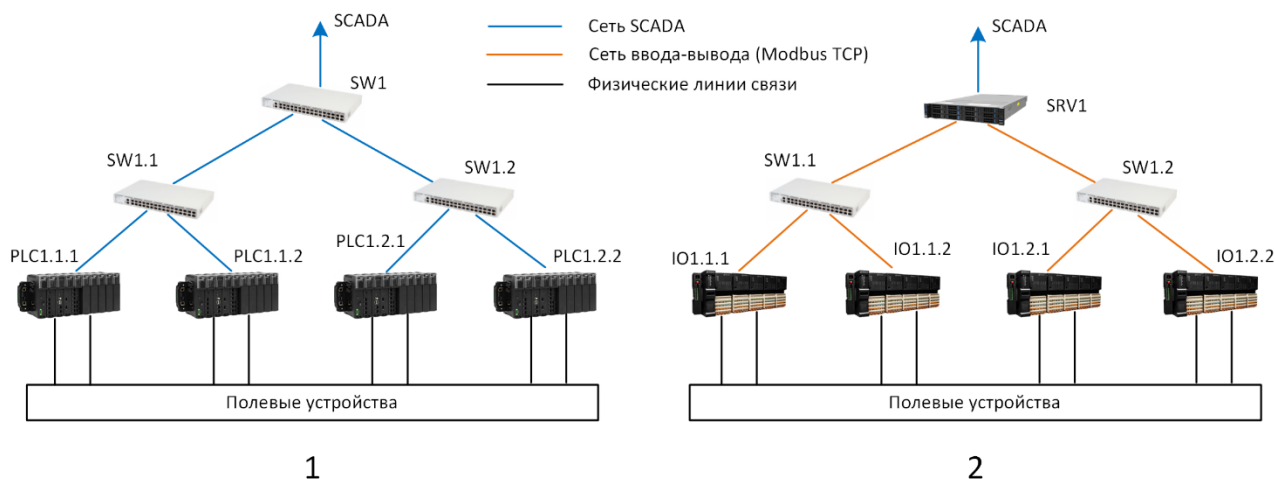


Рис. 1. Распределенная (1) и централизованная (2) архитектуры АСУТП. PLC – программируемые логические контроллеры, SW – сетевые коммутаторы, IO – станции удаленного ввода-вывода, SRV – центральный сервер.

В распределенной архитектуре алгоритмы управления реализуются в локальных контроллерах, которые размещаются в помещениях аппаратных, находящихся в непосредственной близости от технологических узлов.

В централизованной архитектуре вычислительные функции реализуются на удаленном сервере или центральном контроллере. Полевые устройства и модули ввода-вывода взаимодействуют с сервером через сеть передачи данных.

Обе структуры удовлетворяли ограничениям по надежности и времени обработки сигнала и имели сопоставимую стоимость, тем не менее оставался открытым вопрос влияния структуры на качество управления технологическим объектом.

Для исследования был выбран узел абсорбции – моногидратный абсорбер 2МНГ. Данный узел представляет собой заключительную стадию производства серной кислоты и характеризуется высокой технологической ответственностью. В узле необходимо обеспечивать: поддержание концентрации кислоты, подаваемой на орошение, поддержание температуры кислоты на орошение, поддержание уровня в сборнике кислоты, поддержание расхода кислоты на орошение. Требуемые уставки задаются технологическим регламентом. Схема установки показана на рисунке 2.

Целью работы являются: построение математической модели объекта, идентификация параметров модели по архивным данным, моделирование различных аппаратных архитектур АСУТП, синтез регуляторов, сравнение качества управления, выбор наиболее подходящей архитектуры. Подробно моделирование технологического процесса получения серной кислоты контактным способом на промышленной установке описано в [8].

На заключительной стадии осуществляется поглощение триоксида серы циркулирующей серной кислотой в абсорбере (рис. 2.). В процессе абсорбции выделяется значительное количество тепла, поэтому требуется эффективное охлаждение кислоты и поддержание стабильных технологических параметров.

Рассматриваемый узел включает: абсорбер (п. 278), сборник кислоты (п. 279), насос циркуляции (п. 280), теплообменники (п. Т-281/9,10), регулирующие клапаны, датчики температуры, уровня, расхода и концентрации.

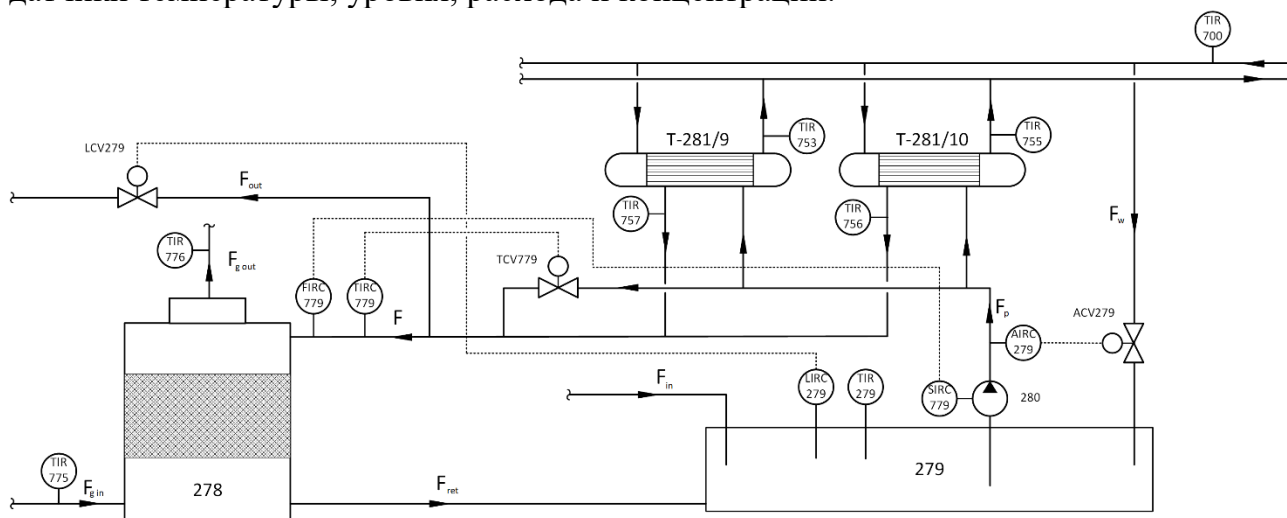


Рис. 2. Функциональная схема технологического процесса

Основными регулируемыми параметрами являются: концентрация кислоты в сборнике (п. A279), температура кислоты, подаваемой на орошение (п. T779), уровень в сборнике (п. L279), расход кислоты на орошение (п. F779).

Для регулирования используются: клапан подачи воды (п. ACV279), клапан регулирования температуры на байпасе холодильников (п. TCV779), клапан отвода кислоты (п. LCV279), частотно-регулируемый привод насоса (п. MP280).

Стабильность работы узла напрямую влияет на эффективность всего производства. Нарушение температурного режима или концентрации кислоты может приводить к ухудшению степени абсорбции и снижению качества продукции.

Изменение концентрации кислоты определяется балансом массы [9]. На концентрацию влияют приток моногидрата, подача воды, расход кислоты, объем жидкости в сборнике.

Дифференциальное уравнение концентрации может быть записано в виде:

$$\dot{C} = \frac{F_{in}(C_{in}-C) + F_{ret}(C_{ret}-C) + F_w(C_w-C)}{V(L)}, \quad (4)$$

где C – концентрация кислоты, F_{in} – входящий поток кислоты (моногидрата), C_{in} – концентрация входящего потока, F_{ret} – возвратный поток с абсорбера, C_{ret} – концентрация возвратного потока, F_w – расход воды, $C_w = 0$ – концентрация кислоты в воде, $V(L)$ – объем жидкости в сборнике.

Температурный режим определяется тепловым балансом. На температуру влияют тепловыделение при абсорбции, охлаждение в теплообменниках, расход циркуляции, температура охлаждающей воды.

Уравнение температуры может быть представлено в виде:

$$\dot{T} = \frac{T_{mix}-T}{\tau_T} + k_F(F - F_0) + k_w(T_w - T_{w0}), \quad (5)$$

где T – температура кислоты, T_{mix} – температура смешения, τ_T – постоянная времени, F – расход кислоты на орошение, T_w – температура охлаждающей воды. Температура смешения определяется положением регулирующего клапана байпасной линии теплообменника.

Уровень в сборнике определяется балансом расходов [9]:

$$\dot{L} = \frac{1}{A_s(L)} (F_w + F_{in} + \Delta F_{ret} - F_{out}) + q_L, \quad (6)$$

где L – уровень в сборнике кислоты, ΔF_{ret} – поток кислоты, полученной в результате абсорбции, F_{out} – расход отвода кислоты с установки, $A_s(L)$ – площадь сечения жидкости в сборнике.

Динамика регулирующих клапанов и насосов описывается аperiodическими звеньями первого порядка:

$$\dot{u} = -\frac{1}{\tau_u} u + \frac{k_u}{\tau_u} u_{cmd}, \quad (7)$$

где u – текущее положение исполнительного механизма, u_{cmd} – управляющее воздействие, τ_u – постоянная времени, k_u – коэффициент усиления.

Для синтеза регуляторов и анализа устойчивости выполнена линеаризация модели в рабочей точке. После линеаризации система была представлена в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + G_m d_m + G_h d_h \\ y = C_y x \end{cases}, \quad (8)$$

где x – вектор состояний, u – вектор управления, d_m – вектор измеряемых возмущений, d_h – вектор неизмеряемых возмущений, A – матрица динамики, B – матрица управления, G_m , G_h – матрицы возмущений, C_y – матрицы выхода.

Вектор состояний включает:

$$x = [C \quad T \quad L \quad F \quad F_w \quad F_{out} \quad \alpha_T \quad C_{mix}]^T, \quad (9)$$

где α_T – доля смешения горячего и холодного потоков кислоты, C_{mix} – измеренная концентрация кислоты на орошение (стремится к истинной концентрации C после перемешивания).

Вектор управления:

$$u = [u_A \quad u_T \quad u_L \quad u_F]^T, \quad (10)$$

где u_A – управляющее воздействие на клапан подачи воды в сборник, u_T – управляющее воздействие на байпасный клапан контура регулирования температуры, u_L – управляющее воздействие на клапан отвода кислоты с установки, u_F – сигнал частотного привода насоса.

Ключевой особенностью предлагаемого подхода является включение аппаратной архитектуры программно-технического комплекса АСУТП непосредственно в математическую модель системы. В традиционных моделях система управления рассматривается как идеальная. Предполагается, что измерения передаются мгновенно, вычисления выполняются без задержек, управляющие воздействия поступают без потерь, сеть передачи данных не влияет на динамику.

В реальных АСУТП данные предположения не выполняются. В случае распределенной архитектуры сигнал проходит цепочку: датчик → модуль ввода → системная шина данных → контроллер → системная шина → модуль вывода → исполнительный механизм. В случае централизованной архитектуры сигнал проходит цепочку: датчик → модуль ввода → системная шина данных → концентратор → коммутатор(ы) → сервер → коммутатор(ы) → концентратор → системная шина → модуль вывода → исполнительный механизм. В результате возникают транспортные задержки, джиттер, потери пакетов, квантование по времени, асинхронность измерений. Таким образом, система становится сетевой системой управления.

На задержки (запаздывание) в системе оказывают влияние время преобразования модулей ввода-вывода, время передачи по сети, время опроса, время цикла работы прикладной программы контроллера (сервера).

Модель задержки может быть представлена в виде:

$$\tau(t) = \tau_0 + \Delta\tau(t), \quad (11)$$

где τ_0 – средняя задержка, $\Delta t(t)$ – случайная составляющая (используется усеченное нормальное распределение с ограничениями, вычисляемыми с учетом характеристик применяемого оборудования).

Передача данных по сети может сопровождаться потерями пакетов.

Потери моделируются бинарным процессом (распределение Бернулли):

$$\gamma(k) = \begin{cases} 1, & \text{пакет доставлен} \\ 0, & \text{пакет потерян} \end{cases} \quad (12)$$

Управляющее воздействие в системе с потерями описывается как:

$$u(k) = \gamma(k)u_c(k) + (1 - \gamma(k))u(k - 1), \quad (13)$$

где $u_c(k)$ – вычисленное управление, $u(k - 1)$ – предыдущее значение.

Дополнительно учитывались цикл выполнения прикладной программы, период опроса модулей по системной шине, период опроса сервером, задержки коммутационного оборудования. Значения параметров каналов связи приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры каналов связи

Параметр	Значение	Ед. изм.
Время преобразования модуля аналогового ввода	35	мс
Время преобразования модуля аналогового вывода	2	мс
Цикл опроса по системной шине	10	мс
Таймаут опроса по системной шине	20	мс
Цикл работы прикладной программы ПЛК	500	мс
Цикл работы прикладной программы сервера	100	мс
Цикл опроса сервера	1000	мс
Таймаут опроса сервера	5000	мс
Задержка коммутатора	5	мс
Вероятность потери пакета на устройстве	0,02	отн. ед.

Параметры модели

рассчитывались, исходя из паспортных данных оборудования и регламентных данных технологического процесса, а затем уточнялись с помощью идентификации. Для идентификации параметров использовались архивные данные реального производства. Архив включал концентрацию кислоты, температуру кислоты на орошение, значение уровня кислоты в сборнике, расход на орошение, положения регулирующих клапанов, частоту ЧРП насоса, температуру охлаждающей воды, температуру кислоты после теплообменников,

концентрацию кислоты, поступающей в сборник от сушильного блока. Для проведения идентификации данные подвергались предварительной обработке. Было произведено выравнивание по временной сетке, фильтрация, интерполяция пропусков.

Для идентификации использовались методы субпространственной идентификации N4SID и идентификация методом «серого ящика» (grey-box) в пакете MATLAB. При grey-box идентификации структура модели задается на основе физических законов в виде (8), а идентифицируются только коэффициенты (при этом сохраняется физический смысл параметров). Наиболее высокое качество идентификации было получено для каналов расхода, уровня и температуры. Дополнительно проводилась верификация модели, при которой модель воспроизводила динамику объекта без использования архивных выходных переменных. Пример результата идентификации канала расхода показан на рисунке 3.

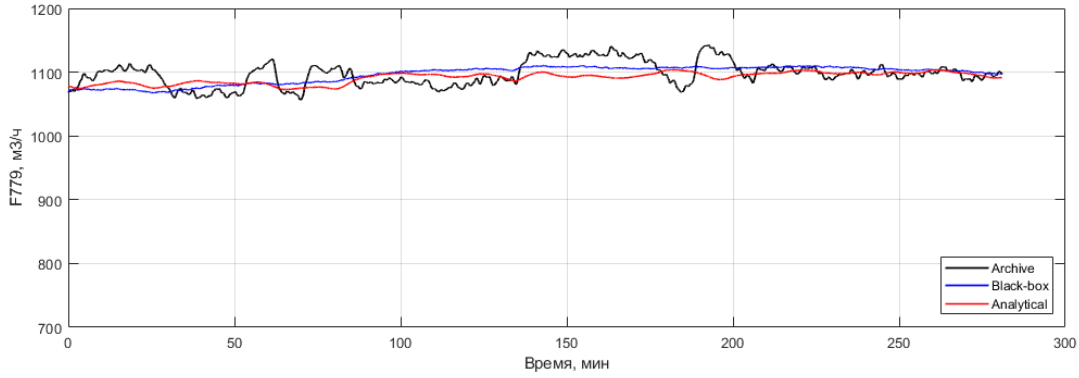


Рис. 3. Идентификация расхода на орошение. Черная линия – архивные данные, синяя – модель, полученная с помощью N4SID, красная линия – модель, полученная с помощью grey-box идентификации.

Полученная система является полностью управляемой и полностью наблюдаемой. Управляемость и наблюдаемость проверялись по рангам матриц Калмана.

После идентификации математической модели был выполнен синтез регуляторов для исследуемых архитектур АСУТП с применением техники линейных матричных неравенств (ЛМН) [10], [11]. Использование ЛМН обусловлено возможностью учета многомерности объекта, сетевых задержек, неопределенностей модели, неизмеряемых возмущений и ограничений на управляющие воздействия. Рассматриваемая система является сетевой системой управления, поэтому при синтезе регулятора необходимо учитывать транспортные задержки, джиттер, потери пакетов и изменяющиеся параметры каналов связи.

После линеаризации объект управления описывается системой (8). При наличии сетевых задержек модель принимает вид:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau_x(t)) + Bu(t - \tau_u(t)) + E\omega(t), \quad (14)$$

где $\tau_x(t)$ – задержка в измерительном канале, $\tau_u(t)$ – задержка в управляющем канале, $A_d(t)$ – матрица влияния запаздывающего состояния, $E\omega(t) = G_m d_m(t) + G_h d_h(t)$.

При этом управляющее воздействие в системе с потерями пакетов с учетом (13) записывается как:

$$u(k) = \gamma(k)Kx(k) + (1 - \gamma(k))u(k - 1), \quad (15)$$

где K – матрица регулятора.

Требуется найти такой закон управления $u(t) = Kx(t)$ при котором система остается устойчивой, обеспечивается заданное качество регулирования, система устойчива к неопределенностям и возмущениям, учитываются сетевые задержки и потери пакетов.

Для решения задачи используется квадратичная функция Ляпунова:

$$V(x) = x^T P x, \quad (16)$$

где $P = P^T > 0$ – положительно определенная матрица.

Условие устойчивости:

$$(A + BK)^T P + P(A + BK) < 0, \quad (17)$$

Это условие является билинейным относительно P и K . Для перехода к ЛМН вводится замена переменных $Y = KP$. Тогда условие устойчивости принимает вид:

$$AP + PA^T + BY + Y^T B^T < 0. \quad (18)$$

Выражение (18) является линейным матричным неравенством.

Для обеспечения робастности к возмущениям использовался H_∞ -подход. Рассматривается функционал:

$$\|z\|_2 < \gamma \|\omega\|_2, \quad (19)$$

где: z – регулируемый выход, ω – внешнее возмущение, γ – уровень подавления возмущений.

Условие существования H_∞ -регулятора формулируется в виде ЛМН:

$$\begin{bmatrix} AP + PA^T + BY + Y^T B^T & E & (CP + DY)^T \\ E^T & -\gamma I & 0 \\ CP + DY & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0. \quad (20)$$

Решение системы неравенств позволяет получить матрицу усиления $K = YP^{-1}$.

Для учета задержек в измерительном и управляющем каналах используется модель с запаздывающим состоянием и запаздывающим управлением. При ограниченных задержках τ_x, τ_u достаточное условие устойчивости может быть записано в виде ЛМН:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & PA_d & PB \\ A_d^T P & -Q_x & 0 \\ B^T P & 0 & -Q_u \end{bmatrix} < 0. \quad (21)$$

где: $\Phi_{11} = A^T P + PA + Q_x + Q_u$, а $Q_x > 0, Q_u > 0$ – дополнительные положительно определенные матрицы.

Кроме этого, реальный объект управления содержит неопределенности параметров. Модель представляется как $A = A_0 + \Delta A$, где: A_0 – номинальная матрица, ΔA – неопределенность.

Для робастной устойчивости для всех допустимых ΔA требуется выполнение условия:

$$(A_0 + \Delta A)^T P + P(A_0 + \Delta A) < 0. \quad (22)$$

Так как часть переменных состояния недоступна для прямого измерения, дополнительно выполнялся синтез наблюдателя.

Использование техники линейных матричных неравенств обладает рядом преимуществ по сравнению с классическими методами настройки регуляторов, а именно: возможность учета структуры объекта с несколькими входами и несколькими выходами, возможность учета сетевых задержек (запаздываний), возможность учета неопределенностей, робастность к внешним возмущениям, возможность учета ограничений, гарантированная устойчивость, возможность совместного синтеза регулятора и наблюдателя.

Проведенный синтез показал, что полученный регулятор обеспечивает приемлемое качество управления. Особенно существенное преимущество наблюдается при наличии переменных задержек, потерь пакетов и неопределенностей модели.

Для централизованной архитектуры полученный регулятор позволил компенсировать часть негативного влияния сетевой инфраструктуры. Тем не менее распределенная архитектура показала лучшие показатели качества для быстрых контуров регулирования.

Результаты показали, что увеличение задержек приводит к росту времени регулирования и ухудшению устойчивости. Особенно сильное влияние наблюдалось для быстрого контура регулирования расхода. Переходные характеристики каналов расхода и температуры для распределенной и централизованной архитектур АСУТП показаны на рис. 4, 5.

Полученные показатели качества регулирования приведены в таблице 2. Интегральные ошибки IAE и ISE приведены в относительных единицах.

Таблица 2. Показатели качества

Показатель	Расход, F779		Температура, T779	
	Распред.	Центр.	Распред.	Центр.
Время регулирования, с	145	310	1320	1540
Перерегулирование, %	0	0	0	0
Интегральная абсолютная ошибка (IAE)	58	146	420	615
Интегральная квадратичная ошибка (ISE)	24	96	118	242

Результаты моделирования показали существенную зависимость качества управления от структуры АСУТП. Например, контур регулирования температуры (рис. 5) оказался умеренно чувствительным к задержкам. Централизованная архитектура

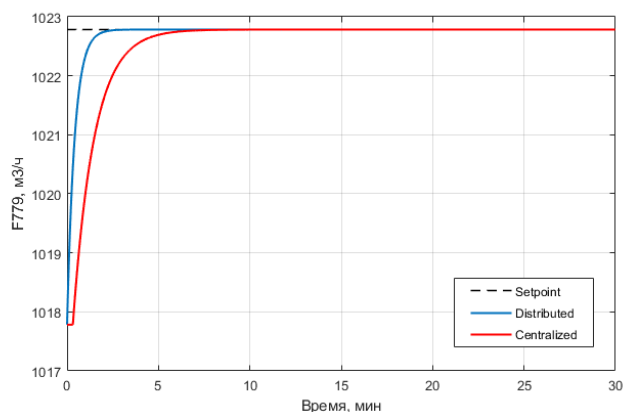


Рис. 4. Переходная характеристика расхода

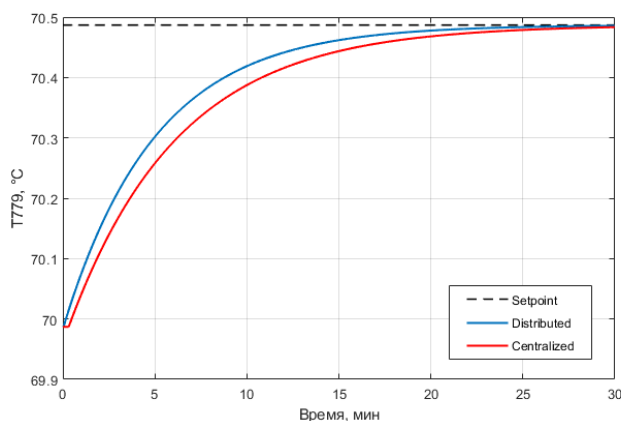


Рис. 5. Переходная характеристика температуры

приводила к увеличению времени регулирования и росту интегральной ошибки. Тем не менее система сохраняла работоспособность.

Наиболее существенные различия наблюдались для быстрого контура регулирования расхода (рис. 4). В распределенной архитектуре управление выполнялось локально, задержки были минимальны, обеспечивалось быстрое подавление возмущений. В централизованной архитектуре возрастало время транспортировки сигнала, увеличивался джиттер, ухудшалось качество переходного процесса.

Таким образом, для быстропротекающих процессов использование распределенной архитектуры оказывается предпочтительным. Полученные результаты подтверждают необходимость учета архитектуры программно-технического комплекса при проектировании АСУТП.

Применение модели объекта управления (цифрового двойника), позволяет учитывать динамику реального объекта, сравнивать различные архитектуры еще до внедрения, а также обеспечивает количественную оценку качества управления.

Дальнейшим развитием исследования являются расширение модели, применение методов машинного обучения и автоматизация структурной оптимизации АСУТП.

Библиографический список

1. Межотраслевая рабочая группа «Открытая АСУТП». URL: <https://openapc.ru/> (дата обращения 18.05.2026)
2. Резчиков, А. Ф. Алгоритм оптимизации структур робототехнических сборочных комплексов / А. Ф. Резчиков, А. А. Большаков, Д. Ю. Петров, Д. Д. Яковлев // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 5. – С. 3-10. – EDN XPR1YI.
3. Закирзянов, Р. М. Применение метаэвристических алгоритмов для оптимизации структуры промышленной системы управления / Р. М. Закирзянов // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2025. – Т. 1. – С. 35-37. – EDN QETZNZ.
4. Закирзянов, Р. М. Использование биоинспирированного метаэвристического алгоритма оптимизации для генерации иерархической структуры программно-технического комплекса АСУТП / Р. М. Закирзянов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. №2. (в печати)
5. Гладков, Л. А. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары: ООО «Издательский дом «Среда», 2024. – 228 с. – EDN: KNNQTN.
6. Васильев, Б. Т. Технология серной кислоты / Б. Т. Васильев, М. И. Отвагина. – М.: Химия, 1985.
7. Закирзянов, Р. М. Опыт импортозамещения АСУТП непрерывного производства в химической промышленности / Р. М. Закирзянов, А. Р. Латыпов, А. И. Шпилев // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 12. – С. 43-48. – EDN MWSHQV.
8. Kiss, A. A. Dynamic modeling and process optimization of an industrial sulfuric acid plant / A. A. Kiss, C. S. Bildea, J. Grievink // Chemical Engineering Journal, Vol. 158, Iss. 2, 2010, pp. 241-249, DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.023.

9. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебник для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2026. – 403 с.
10. Поляк, Б. Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
11. Boyd, S. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory / S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994. – 205 p.