



АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФОРМАЛИНА

Ботиров Т.В ^{1[0000-0001-5422-9140]}, **Салохитдинов А.Ж** ^{2[0009-0005-4786-0707]}

¹Навоийский государственный горно-технологический университет, кафедра
Автоматизация и управление, профессор, д.т.н.

²Навоийский государственный горно-технологический университет, магистрант
кафедры Автоматизация и управление

Аннотация. В статье представлены подходы к синтезу управляющих устройств, обеспечивающих стабильное и эффективное регулирование теплообменных процессов, сопровождающих производство формалина. Теплообменные аппараты находят широкое применение в химической промышленности благодаря возможности функционировать при различных температурах и давлениях. Ключевой задачей таких систем является обеспечение требуемого уровня температуры на выходе, что делает температурное управление критически важным. Проведён обзор существующих методов управления, сформирована математическая модель теплообменного устройства, а также разработаны и протестированы алгоритмы на основе ПИД-регулирования и адаптивных методов. Результаты моделирования демонстрируют надёжность и адаптивность предложенного подхода при изменении условий работы установки.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, формалин, адаптивные алгоритмы, ПИД-регулирование.

Annotatsiya. Ushbu maqolada formalin ishlab chiqarish jarayonidagi issiqlik almashinuvi tizimlarini samarali boshqarishni ta'minlovchi boshqaruv qurilmalari sintezi yondashuvlari bayon etilgan. Issiqlik almashinuvchi qurilmalar kimyo sanoatida keng qo'llaniladi, chunki ular turli harorat va bosim sharoitlarida ishlay oladi. Bunday tizimlarning asosiy vazifasi chiqishdagi haroratni belgilangan darajada ushlab turish bo'lib, bu parametr ustidan nazoratni muhim qiladi. Amaldagi boshqaruv usullari tahlil qilindi, issiqlik almashinuvchi tizimning matematik modeli tuzildi, shuningdek, PID-regulyatorlar va moslanuvchan (adaptiv) algoritmlar asosida boshqaruv yechimlari ishlab chiqildi va sinovdan o'tkazildi. Modellastirish natijalari ishlab chiqilgan yondashuvning texnologik qurilma ishining turli rejimlarida ishonchliligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: issiqlik almashinuvchi qurilma, formalin, adaptiv boshqaruv, PID-regulyator.

Abstract. This paper presents approaches to the synthesis of control devices designed to ensure stable and efficient regulation of heat exchange processes in formalin production. Heat exchangers are widely used in the chemical industry due to their ability to operate under varying temperatures and pressures. The primary objective of such systems is to maintain the desired outlet temperature, making temperature control a critical task. The study includes a review of existing control methods, the development of a mathematical model of the heat exchange system, and the design and testing of control algorithms based on PID regulation and adaptive techniques. Simulation results demonstrate the reliability and adaptability of the proposed approach under different operating conditions of the technological unit.

Keywords: heat exchanger, formalin, adaptive control, PID controller.

Введение

На практике все химические процессы сопровождаются выделением или поглощением энергии в виде тепла. Теплообменники широко применяются в химической промышленности для передачи тепла от горячей среды через твёрдую стенку к более холодной. В промышленности используется множество различных типов теплообменников, но наибольшее распространение получила система теплообменников [1].

Теплообменники, вероятно, являются наиболее универсальными типами устройств, применяемых в широком диапазоне рабочих температур и давлений. Они имеют большее соотношение площади теплообменной поверхности к объёму



по сравнению с теплообменниками типа «кожух трубчатый», а также легко изготавливаются в самых различных размерах и конфигурациях. Кожух трубчатые теплообменники могут работать при высоком давлении, но их конструкция довольно трудно чтобы разбирать их для проведения регулярного технического обслуживания и очистки.

Теплообменники данного вида широко применяются в холодильной технике, энергетике, системах отопления и кондиционирования воздуха, в химических процессах, производстве и медицине. Теплообменник кожух трубный является развитием конструкции типа «труба в трубе». Вместо одной трубы, вставленной в другую, теплообменник состоит из пучка труб, заключённых в цилиндрический корпус. В процессе теплообмена одна среда проходит внутри труб, а вторая в пространстве между трубами и внешним корпусом.

В производстве формалина, как правило и в других химических процессах актуален вопрос теплообмена, так как производство этого водного раствора осуществляется путем каталитического окисления метанола с выделением значительного количества тепла. Эффективное управление температурными режимами в теплообменниках, обеспечивающих охлаждение реакционной смеси и утилизацию тепла, играет ключевую роль в стабильности технологического процесса и качестве конечного продукта.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритмов синтеза управляющих воздействий для теплообменных процессов, обеспечивающих устойчивое и энергоэффективное функционирование установки.

Методология

Объектом управления является кожух трубный теплообменник, в котором осуществляется теплообмен между реакционной смесью (внутри трубок) и охлаждающей средой (в кожухе). Воздействием управления является расход охлаждающей среды, а управляемой величиной температура реакционной смеси на выходе.

Среди возможных возмущений: колебания температуры и расхода на входе, изменение тепловых характеристик реагентов, загрязнение поверхности теплообмена.

Типичный взаимодействующий химический процесс нагрева включает в себя химический реактор и систему теплообменника. В нашем случае это реакционный газ (пары формальдегида), выходящий из каталитического окисления. Реакционный газ подаётся в теплообменную систему. Теплообменник охлаждает жидкость до заданной температуры с помощью двух поступающих, первый который является сжиженный воздух, второй спирта-воздушная смесь из спирта-испарителя с температурами поступления 90 и 30 °С, соответственно.

Система теплообменника

В данной системе обратной связи регулятор работает в режиме обратного действия, а используемый клапан типа «открытие воздухом» (закрытие при отказе, fail-close). В качестве измерительного элемента применяется термopapa, установленная в контуре обратной связи системы управления.

Температура выходящей жидкости измеряется термopарой, и её выходной сигнал (напряжение) передаётся на передатчика, который преобразует его в стандартный унифицированный токовый сигнал в диапазоне 4–20 мА. Этот сигнал затем подаётся на регулятор. Регулятор реализует алгоритм управления, сравнивает

текущее значение с заданным и формирует управляющее воздействие на исполнительный механизм.

Исполнительный механизм представляет собой преобразователь «ток–давление», а конечный регулирующий орган — это клапан, управляемый воздухом (открытие воздухом, закрытие при отказе). Преобразователь принимает выходной сигнал регулятора (4–20 мА) и преобразует его в стандартный пневматический сигнал давления в диапазоне 20–100 кПа (0,2–1 кгс/см²). Клапан срабатывает в соответствии с командами регулятора. На рисунке 1 показана базовая схема обратной связи, реализованная в системе теплообменника.

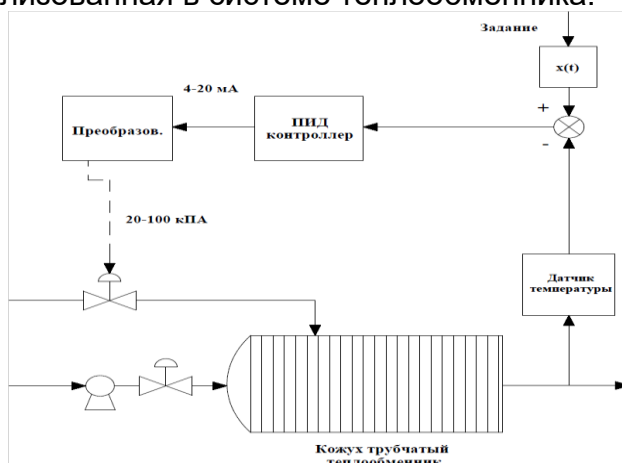


Рис.1. Схема управления системой теплообменника.

В данном процессе возможны два типа возмущений: первое колебания расхода входящей жидкости, второе изменение температуры этой жидкости. Однако на практике колебания расхода входной среды являются более значительным возмущением, чем изменения её температуры.

Поэтому в контуре управления с опережающей связью (feed-forward) измеряется расход входящей жидкости, и возникающие возмущения по расходу компенсируются с помощью регулятора опережающего действия. Выходы обратного и опережающего регуляторов суммируются, и результирующий сигнал подаётся на управляющий клапан. Введение опережающего регулятора позволяет дополнительно оптимизировать характеристики управления.

Формула ПИД- регулирования

Непрерывное выражение ПИД регулятора

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

K_p — коэффициент пропорционального звена (proportional gain), K_i — коэффициент интегрального звена (integral gain), K_d — коэффициент дифференциального звена (derivative gain) [2-4].

На протяжении последних десятилетий было разработано множество методов настройки ПИД-регуляторов, основанных на частотных характеристиках систем. К ним относятся классические правила, такие как метод Циглера–Николса, правило симметрического оптимума, правило без перерегулирования, а также более современные критерии, использующие интегралы ошибок по времени или квадратам ошибок [5]. Данные методы популярны благодаря своей простоте и наличию готовых формул для расчета параметров регулятора. Однако они учитывают лишь ограниченную информацию о динамике управляемого объекта. В

результате, в ряде случаев они не обеспечивают желаемого качества регулирования и приводят к колебательным переходным процессам. Тем не менее, метод Циглера–Николса, предложенный еще в 1940-х годах, по-прежнему активно используется в промышленности благодаря своей универсальности и практической применимости для широкого класса систем.

Передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2)$$

где $Y(s)$ - изображение Лапласа выходного сигнала, $U(s)$ - изображение Лапласа входного сигнала, s - комплексная переменная Лапласа.

Дифференциальный вид передаточной функции исходит из уравнение динамики в нормализованном виде в разностной форме

$$\rho V c_p \frac{dT_{\text{БЫХ}}(t)}{dt} + G c_p \Delta T_{\text{БЫХ}}(t) = \Delta G_T(t) c_{\text{РТ}} (T_{\text{Т}}^{\text{БХ}} - T_{\text{Т}}^{\text{БЫХ}}) \quad (3)$$

$G_{\text{Т}}, C_{\text{РТ}}, T_{\text{Т}}^{\text{БХ}}$ - входные значения хладагента

$G, C_{\text{р}}, T_{\text{ВХ}}$ - входные значения реакционного газа

На основе экспериментальных данных были определены соответствующие коэффициенты усиления системы уравнения второго порядка:

$$3\ddot{y}(t) + \dot{y}(t) + 5y(t) = \dot{u}(t) + 0.5u(t) \quad (4)$$

Применяя преобразование Лапласа, получаем уравнение в виде:

$$3s^2Y(s) + sY(s) + 5Y(s) = sU(s) + 0.5U(s) \quad (5)$$

$$Y(s)(3s^2 + s + 5) = U(s)(s + 0.5)$$

Из выше указанной зависимости выводим формулу, полученную в результате дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{s+0.5}{3s^2+s+5} \quad (6)$$

Разработка PID-регулятора в среде MATLAB

Для создания регулятора, основанного на ПИД-алгоритме (PID), необходимо открыть окно проектирования нечёткой логики. Это выполняется путём ввода команды `fuzzy` в основном окне MATLAB. На рисунке 2 приведён внешний вид функционального блока для проектирования регулятора.

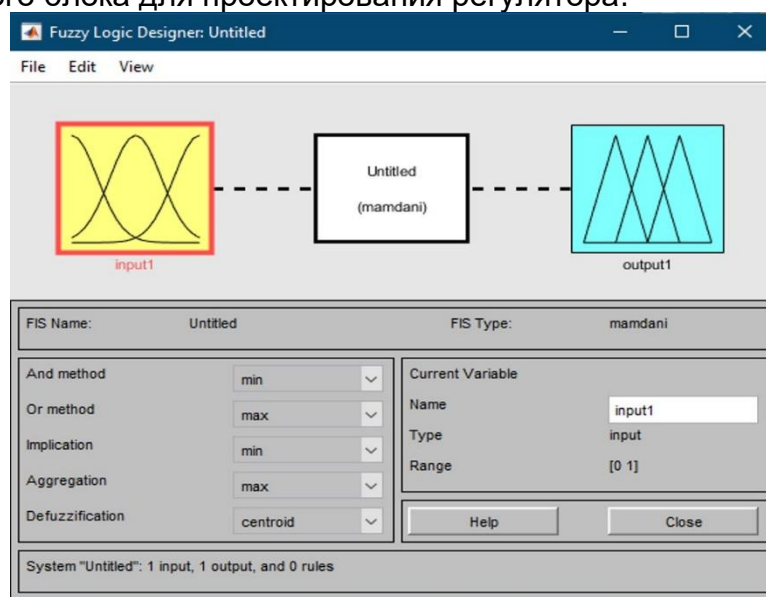


Рис.2 – Окно проектирования регулятора на основе нечёткой логики в MATLAB

Далее необходимо открыть пакет Simulink в среде MATLAB и собрать имитационную модель системы. Для этого используются стандартные функциональные блоки, такие как: одноступенчатый генератор сигнала Step, сумматор, блок передаточной функции (Transfer Function), регулятор на основе нечёткой логики (Fuzzy Logic Controller) и ПИД-регулятор (PID).

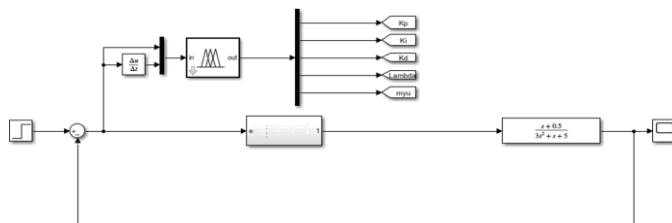


Рис.3. Модель имитационного моделирования PID-регулятора в среде SIMULINK.

Ниже представлено изображение функционального блока подсистемы. Оно включает три основные составляющие ПИД-регулятора, представленные на рис.4

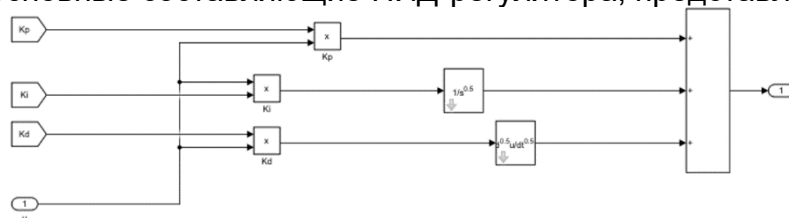


Рис.4. Внутренняя структура подсистемы PID-регулятора.

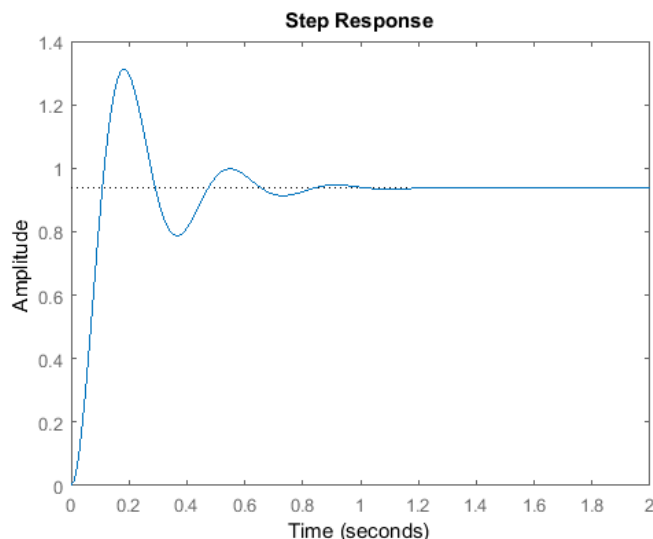


Рис.5. Настройка блока ПИД-регулятора

Установив время остановки моделирования равным 1.4 секундам, можно проанализировать показатели качества построенной системы управления.

Заключение

Применение интеллектуального ПИД-регулятора представляет собой перспективный подход к управлению теплообменными процессами в производстве формалина. Результаты моделирования подтверждают высокое качество



регулирования температуры на выходе, что критически важно для обеспечения стабильности химических реакций и конечного качества продукта.

Современные методы интеллектуального управления позволяют существенно повысить эффективность тепло и массообмена, рационально использовать энергоресурсы, поддерживать заданные технологические параметры и улучшать экологические показатели производственного цикла. Внедрение таких регуляторов способствует снижению энергозатрат, уменьшению выбросов и более точному соблюдению стандартов безопасности и качества.

С учётом тенденции к наращиванию объёмов производства формалина, интеллектуальные системы управления теплообменом будут играть всё более значимую роль в обеспечении надёжности, гибкости и устойчивости технологических процессов, удовлетворяя растущие требования отрасли и способствуя переходу к «умной» химической промышленности.

Использованная литература

- [1]. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Хусанов С.Н. Алгоритмы синтеза регуляторов в построении дискретных систем управления технологическими объектами // Lecture notes in networks and systems, т. 762, с. 426–439, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-40628-7_36
- [2]. Монхе К.А., Чен И., Винагре Б.М., Сюэ Д., Фелиу В. Системы и управление дробного порядка: основы и применения // Лондон: Springer, 2010.
- [3]. Тепляков А., Петленков Э., Беликов Й. Применение регуляторов дробного порядка в управлении: обзор // International journal of microelectronics and computer science, 2(2), с. 51–62, 2011.
- [4]. Сингх М.К., Пархи Д.Р., Бхоумик С., Кашьяп С.К. Интеллектуальный регулятор для мобильного робота: метод нечёткой логики // 12-я Международная конференция Международной ассоциации по компьютерным методам и достижениям в геомеханике (IACMAG), т. 3, с. 1755–1762, 2018.
- [5]. Мёнгу Чжун, Майкл Г. Софонов. Автоматическая настройка ПИД-регулятора: применение метода недоказуемого управления // Материалы симпозиума IEEE по компьютерным средствам управления и проектированию систем (CACSD), 2019. – С. 1–5.