

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ МОДЕЛИ ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА С ВОДЯНОЙ РУБАШКОЙ

Балахнин И.А.¹, Тутов И.А.²

¹ Томский политехнический университет, студент гр. 8ТМ32, e-mail: iab36@tpu.ru

² Томский политехнический университет, старший преподаватель ОАР ИШИТР, e-mail: ivantutov@tpu.ru

Введение

Химические процессы получения пластмасс с заданными свойствами требуют точной температуры для обеспечения стабильности и эффективности производства. Температура играет ключевую роль в процессах полимеризации в химических реакторах, поскольку ее изменения могут приводить к потере качества выходного продукта и ухудшению безопасности процесса. Одним из наиболее распространенных методов управления температурой является использование пропорционально-интегральных (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов и их модификаций. Однако эти методы управления не всегда обеспечивают требуемую точность регулирования и время переходного процесса, особенно при наличии возмущений и нелинейных эффектов.

Работа направлена на выявление наиболее эффективных алгоритмов регулирования температуры, обеспечивающих минимальное время переходного процесса при перерегулировании менее 4%, так как даже небольшое перерегулирование может привести к браку продукции. Поэтому 4% – это компромиссное значение, которое обеспечивает стабильность без ущерба для качества.

Основная часть

Исследуемая установка (рис. 1) представляет собой физический макет химического реактора с водяной рубашкой. В основе математической модели лежит передача тепловой энергии от нагревателя через теплоноситель (воду) к рабочей камере реактора [1].

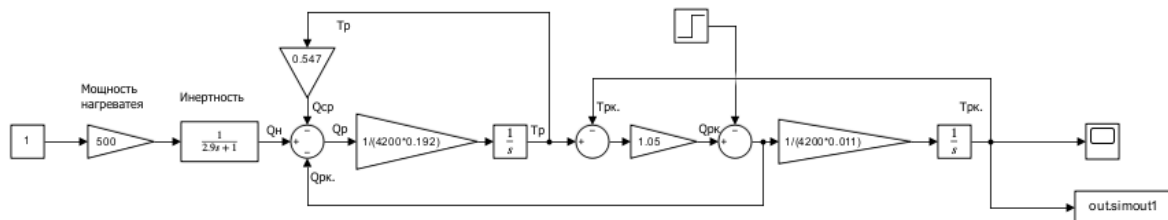


Рис. 1. Объект управления

Дифференциальное уравнение модели в форме вход-состояние-выход (1) имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -x_1 \frac{k_2}{cm_{pk}} + x_2 \frac{k_2}{cm_{pk}}, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 \frac{k_2}{cm_p} - x_2 \left(\frac{k_2}{cm_p} + \frac{k_1}{cm_p} \right) + x_3 \frac{1}{cm_p} + f(t) \frac{k_1}{cm_p}, \\ \frac{dx_3}{dt} = -x_3 \frac{1}{T} + u(t) \frac{k}{T}, \end{cases} \quad (1)$$

где

c – удельная теплоёмкость воды.

m_p – масса воды в рубашке.

m_{pk} – масса воды в рабочей камере.

k_1 – коэффициент теплопередачи стенок между водяной рубашкой и окружающей средой.

k_2 – коэффициент теплопередачи стенок между водяной рубашкой и рабочей камерой реактора.

k – мощность нагревателя.

x_1 – температура рабочей камеры.

x_2 – температура воды в рубашке.

x_3 – количество теплоты, переданное нагревателем.

Матрица коэффициентов состояния A (2), матрица коэффициентов управляющего воздействия B (3) и матрица коэффициентов возмущающего воздействия F (4) равны:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{k_2}{cm_{pk}} & \frac{k_2}{cm_{pk}} & 0 \\ \frac{k_2}{cm_p} & \left(\frac{k_2}{cm_p} + \frac{k_1}{cm_p} \right) & \frac{1}{cm_p} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k}{T} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ cm_{pk} & cm_p & \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Данная установка используется для исследования различных алгоритмов регулирования температуры, включая ПИ, каскадный ПИ-ПИ регулятор и ПИД, а также применение фильтров низкой частоты при дифференциальной составляющей для уменьшения влияния шумов на систему. Для работы были взяты коэффициенты теплопередачи $k_1 = 0,547$ и $k_2 = 1,05$ [2]. Все эксперименты были проведены при мощности нагревателя 592,2 Вт [2]. Была проведена работа с подбором наилучших коэффициентов стандартного ПИ регулятора, ПИ-ПИ регулятора (каскадная система), ПИД регулятора, ПИД регулятора с фильтром низкой частоты 1-го, 2-го и 4-го порядка при дифференциальной составляющей.

Для поиска наилучших коэффициентов использовался перебор значений. Моделирование выполнялось в среде имитационного моделирования. Целью являлся подбор коэффициентов регулятора, обеспечивающих минимальное время переходного процесса с перерегулированием не более 4%.

Алгоритм:

1. Для каждого значения коэффициентов получался температурный отклик системы.
2. Определялось максимальное перерегулирование, при превышении заданного значения переходили к проверке следующего значения.
3. Определялось время установления температуры в пределах $\pm 2\%$ от уставки.
4. Выбирались параметры, обеспечивающие минимальное время переходного процесса и не превышающие 4% перерегулирования.

Каскадное регулирование представляет собой двухконтурную систему управления, где основной (внешний) контур отвечает за поддержание температуры реакционной среды, а вспомогательный (внутренний) контур регулирует температуру теплоносителя в рубашке реактора. Такая архитектура позволяет компенсировать возмущения на более ранней стадии, улучшая качество управления. Минимизация времени переходного процесса проводится аналогично разделу выше с ПИ-регулятором, но с учетом взаимодействия между контурами.

Дифференциальная составляющая ПИД регулятора чувствительна к шумам и высокочастотным помехам. Для реалистичного моделирования ПИД регулятора в контур обратной связи добавлены шумы в пределах $\pm 3\%$ от заданного значения.

Для устранения влияния шумов применяется фильтр низких частот при дифференциальной составляющей. Фильтр первого порядка (5) имеет передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{1}{Tf \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где Tf – постоянная времени фильтра.

Фильтр второго порядка (6) имеет передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{1}{(T_1 f \cdot s + 1)(T_2 f \cdot s + 1)}, \quad (6)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени фильтров.

Исследования проводились при $T = T_1 = T_2$.

Фильтр четвертого порядка (7) обладает более высокой степенью подавления шумов и представлен следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{1}{(T_{14} f \cdot s + 1)(T_{24} f \cdot s + 1)(T_{34} f \cdot s + 1)(T_{44} f \cdot s + 1)}, \quad (7)$$

где T_{14}, T_{24}, T_{34} и T_{44} – постоянные времени фильтров.

Исследования проводились при $T = T_{14} = T_{24} = T_{34} = T_{44}$.

После подготовки всех элементов был выполнен подбор всех коэффициентов, перечисленных выше регуляторов. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение результатов оптимизации

Регулятор	Коэффициенты	Время
ПИ	$K_p = 0.013$ $K_i = 1490$	325 секунд
ПИ-ПИ	$K_{p1} = 0.0170$ $K_{i1} = 1.62$ $K_{p2} = 0.046$ $K_{i2} = 14.00$	250 секунд
ПИД	$K_p = 0.145$ $K_i = 762.0$ $K_d = 47.0$	20 секунды
ПИД с фильтром 1-го порядка	$K_p = 0.1360$ $K_i = 830$ $K_d = 47$ $T_d = 0.24$	19 секунд
ПИД с фильтром 2-го порядка	$K_p = 0.1380$ $K_i = 812$ $K_d = 47$ $T_d = 0.081$	19 секунд
ПИД с фильтром 4-го порядка	$K_p = 0.1380$ $K_i = 824$ $K_d = 46$ $T_d = 0.05$	19 секунд

На рис. 2 приведено сравнение всех регуляторов с наилучшими коэффициентами.

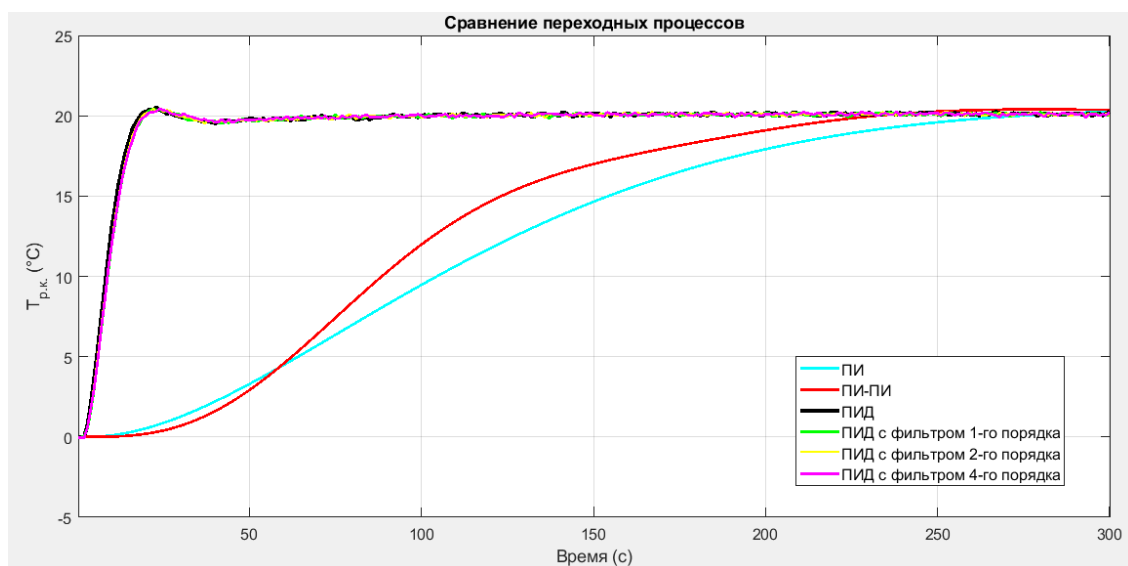


Рис. 2. Переходные процессы ПИ, ПИ-ПИ, ПИД, ПИД (с фильтром 1-го, 2-го и 4-го порядка) регуляторов

Заключение

В ходе работы был проведён сравнительный анализ различных алгоритмов регулирования температуры химического реактора с водяной рубашкой. ПИД регулятор с фильтром 1-го порядка при дифференциальной составляющей демонстрирует наиболее быстрый переходный процесс для данного химического реактора с водяной рубашкой.

Список использованных источников

1. Емельянова Т.А., Гончаров В.И., Дементьев Ю.Н., Тутов И.А. Синтез двухконтурной системы управления химическим реактором численным методом с привлечением регуляризации [Электронный ресурс] – URL: journal.tusur.ru/storage/97946/20-Емельянова-Гончаров-Дементьев-Тутов.pdf?1516334565 1 (дата обращения: 01.04.2025).
2. Скользящие режимы в системе стабилизации температуры химического реактора с водяной рубашкой [Электронный ресурс] URL: earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47989/1/TPU552054.pdf (дата обращения: 01.04.2025).
3. Бутузов Д. В. Математическая модель испытательной установки химического реактора с водяной рубашкой [Электронный ресурс] URL: earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36921/1/conference_tpu-2016-C04_V1_p319-320.pdf?ysclid=m8jys98ppm655361235 (дата обращения: 01.04.2025).
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. Учебник для студентов. – Москва, МЭИ, 2004 [Электронный ресурс] – URL: djvu.online/file/txYZ5ISl34Ure (дата обращения: 01.04.2025).