

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И
ПРОИЗВОДСТВ**

Методические указания к выполнению курсовой работы
для студентов 4 курса очной и заочной форм обучения
специальности 220301



Тамбов
Издательство ТГТУ
2005

УДК 32.97
ББК 681.3(075.8)
А22

Рецензент

А.В. Лагутин

Составители:

*В.А. Погонин, И.А. Елизаров, А.А. Третьяков,
В.Н. Назаров, С.А. Скворцов*

Автоматизация технологических процессов и производств: Метод. указания / Сост.: В.А. Погонин, И.А. Елизаров, А.А. Третьяков, В.Н. Назаров, С.А. Скворцов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 24 с.

Содержат порядок выполнения курсовой работы по курсу «Автоматизация технологических процессов и производств», требования к выполнению курсовой работы, правила оформления расчетно-пояснительной записки.

Предназначены для студентов 4 курса очной и заочной форм обучения специальности 220301.

УДК 32.97
ББК 681.3(075.8)

© Тамбовский государственный
технический университет
(ТГТУ), 2005

Учебное издание

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Методические рекомендации

Составители: ПОГОНИН Василий Александрович,
ЕЛИЗАРОВ Игорь Александрович,
ТРЕТЬЯКОВ Александр Александрович,
НАЗАРОВ Виктор Николаевич,
СКВОРЦОВ Сергей Александрович

Редактор И.А. Денисова
Технический редактор М.А. Евсейчева
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано к печати 16.02.2005.

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,4 усл. печ. л.; 1,2 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 115^М

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполнение курсовой работы базируется на материалах дисциплин: «Математика», «Информатика», «Теория автоматического управления», «Технологические процессы и производства», «Технические измерения и приборы», «Технические средства автоматизации», «Системы автоматизации».

Целью курсовой работы является:

- закрепление и расширение теоретических и практических знаний по специальности;
- развитие навыков самостоятельной работы со специальной литературой, выполнение задач учебно-исследовательского характера по теории и практике решения задач автоматизации технологических процессов;
- получение практических навыков разработки алгоритмов централизованного контроля технологических параметров;
- приобретение навыков по обоснованию выбора, разработке и расчету систем автоматического регулирования технологическими процессами.

2 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Исходными данными и материалами для выполнения курсовой работы являются отчет по производственной практике и литературные источники.

Для выполнения курсовой работы необходимо иметь:

- технологический регламент или выписку из технологического регламента с перечнем всех технологических параметров, подлежащих управлению или контролю и/или сигнализации;
- технологическую схему процесса;
- исходные данные для математического моделирования;
- перечень функций оператора в системе управления.

3 СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Введение (обосновывается актуальность темы курсовой работы, определяется цель и задачи работы).

1 Описание технологической схемы [обосновывается выбор технологической стадии или аппарата, лимитирующего качество готового продукта или производительности технологического процесса (ТП)].

2 Анализ технологического процесса как объекта управления (обосновывается выбор входных воздействий, выходных координат, определение областей изменения входных и выходных переменных).

3 Постановка задач автоматизации (формулировка задач стабилизации и/или программного, оптимального управления, контроля, сигнализации и блокировки и др.).

4 Разработка математической модели объекта управления (математическая модель строится либо аналитическим методом, либо выбирается из литературных источников).

5 Имитационные исследования объекта управления (с использованием математической модели проводится расчет статических и/или динамических характеристик объекта управления с целью выявления управляющих воздействий и наиболее существенных возмущений).

6 Выбор структурной схемы системы регулирования (из анализа статических, динамических характеристик обосновывается выбор одноконтурной, комбинированной или каскадной АСР).

7 Расчет настроек регуляторов системы регулирования.

8 Анализ показателей качества процесса регулирования.

Выводы.

Список используемых источников.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Важным этапом в разработке систем автоматизации является анализ основных стадий ТП как объектов управления, т.е. выявление всех существующих входных и выходных переменных и анализ статических и динамических характеристик каналов возмущения и регулирования. Исходными данными при этом служат математическая модель ТП и (как первое приближение) статическая модель в виде уравнений материального и энергетического балансов. На основе этих уравнений, с учетом условий работы аппарата, все факторы, влияющие на ТП, разбиваются на группы.

Возмущения, допускающие стабилизацию. К таким параметрам относятся некоторые показатели входных потоков. Так, расход жидкости можно стабилизировать, если перед аппаратом имеется буферная емкость, сглаживающая колебания расхода на выходе из предыдущего аппарата; стабилизация температуры входного потока возможна, если перед аппаратом установлен теплообменник и т.п. Очевидно, при проектировании систем управления целесообразно предусмотреть стабилизацию таких возмущений.

Контролируемые возмущения. К ним условно относятся те возмущения, которые можно измерить, но невозможно или недопустимо стабилизировать (расход жидкости, подаваемой непосредственно из предыдущего аппарата, температура окружающей среды и т.п.). Наличие существенных нестабилизируемых возмущений требует применение либо замкнутых по основному параметру ТП систем регулирования, либо комбинированных АСР.

Неконтролируемые возмущения. К ним относятся те возмущения, которые невозможно или нецелесообразно измерять непосредственно. Первые – это, например, падение активности катализатора, изменение коэффициентов тепло-массопередачи и т.п. Примером вторых может служить давление греющего пара в заводской сети, которое изменяется случайным образом. Наличие таких возмущений требует обязательного применения замкнутых по основному параметру ТП систем автоматизации.

Регулирующие воздействия. Это материальные и тепловые потоки, которые можно автоматически изменять для поддержания регулируемых (выходных) переменных ТП.

Выходные переменные. При построении замкнутых АСР, в качестве регулируемых координат, выбирают технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального или теплового баланса в аппарате, что в конечном итоге влияет на качество готового продукта. К ним, например, относятся: уровень жидкости – показатель баланса по жидкой фазе; давление – показатель баланса по газовой фазе; температура – показатель энергетического баланса в аппарате; концентрация – показатель материального баланса по компоненту.

Анализ возможных регулирующих воздействий и выходных координат объекта управления позволяет предварительно выбрать каналы регулирования. Окончательный выбор каналов регулирования проводят на основе сравнительного анализа статических и динамических характеристик различных каналов. При этом учитываются такие показатели, как коэффициент усиления, время чистого запаздывания, его отношение к наибольшей постоянной времени канала τ/T .

Выбор структуры АСР. На основе анализа ТП как объекта управления производится выбор структуры АСР, обеспечивающей решение поставленной задачи автоматизации. Структура АСР выбирается в зависимости от τ/T , методика выбора представлена в [1].

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов / Под ред. Е.Г. Дудникова. М.: Химия, 1987. 368 с.
- 2 Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
- 3 Бодров В.И., Лазарева Т.Я. Теория линейных систем автоматического регулирования. Тамбов: ТГТУ, 1994. 215 с.
- 4 Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. М.: Химия, 1987. 345 с.
- 5 Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. М.: Госэнергоиздат, 1961. 340 с.
- 6 Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1991. 445 с.
- 7 Стандарт предприятия (Проекты дипломные и курсовые. Правила оформления). Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 40 с.
- 8 Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 560 с.

9 Шински Ф. Системы автоматического регулирования химико-технологических процессов. М.: Химия, 1974. 336 с.

10 Эрриот П. Регулирование производственных процессов. М.: Энергия, 1967. 480 с.

ПРИМЕР 1

Разработать систему управления процессом производства пара в котельной установке Е-1,6 ГН. Описание технологического процесса производства пара приведено в технологическом регламенте [1].

1 Анализ процесса производства пара как объекта управления

Для выбора режимов работы, построения системы автоматического регулирования процессами, протекающими при производстве пара, необходимо провести анализ входных и выходных потоков технологического процесса и получить математическое описание объекта управления.

На рис. 1 представлена упрощенная схема котельной установки Е-1,6 ГН.

Анализ литературных источников [1 – 3] и опыта промышленной эксплуатации позволил выявить, что в процессе производства пара на котельной установке Е-1,6 ГН основным выходным параметром (регулируемой переменной) является давление генерируемого пара p .

Входными воздействиями (регулирующими и возмущающими) в процессе производства пара являются степень открытия клапана на подачи топлива μ_2 , степень открытия клапана на линии отбора пара μ_1 (или расход потребляемого пара $g_{\text{п}}$), температуры подаваемой топливной смеси $t_{\text{см}}^{\text{вх}}$ и питающей воды $t_{\text{в}}^{\text{вх}}$, давление в линии подачи топлива $p_{\text{т}}$ и давление в линии потребления пара $p_{\text{пот}}$ (рис. 2).

В качестве регулирующего воздействия может быть выбрана степень открытия клапана на линии подачи топлива в топку, а остальные воздействия являются возмущающими.

Основным возмущающим воздействием на процесс производства пара является колебание давления в линии потребителя пара.

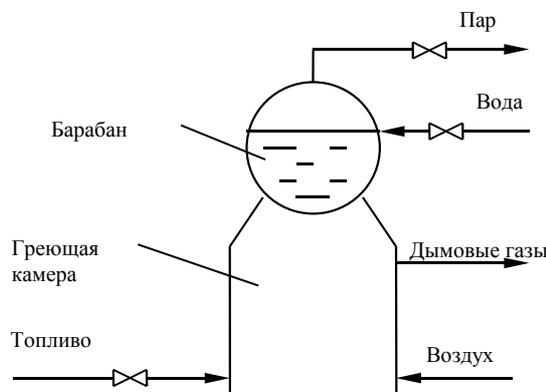


Рис. 1 Упрощенная схема котлоагрегата

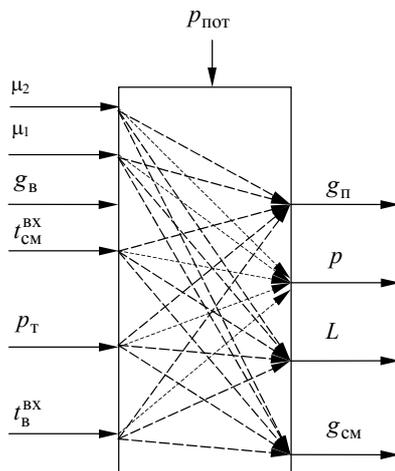


Рис. 2 Связь между входными и выходными параметрами

2 Постановка задач автоматизации

На основании проведенного анализа процесса производства пара как объекта управления можно сформулировать следующие задачи автоматизации.

1 Необходимо обеспечить стабилизацию давления пара на выходе из котлоагрегата за счет изменения расхода топлива.

2 Необходимо обеспечить стабилизацию уровня воды в барабане котлоагрегата изменением расхода питающей воды.

3 Необходимо обеспечить регулирование соотношения расходов топлива и воздуха с целью полного сжигания топлива.

4 Необходимо обеспечить технологический контроль расходов топлива, питающей воды, пара, температуры и давления потребляемого пара.

5 Необходимо обеспечить технологическую сигнализацию максимального давления пара в барабане котлоагрегата, минимальный и максимальный уровень вода в барабане, минимальное значение давления топлива в магистральном трубопроводе.

3 Математическое моделирование объекта управления

Математическое описание объекта управление выбирается из литературных источников, в которых отражены вопросы моделирования подобных технологических процессов. Если в результате анализа литературных источников не удалось найти адекватного математического описания объекта управления, то оно разрабатывается самостоятельно.

В качестве примера приводится математическое описание котлоагрегата как объекта управления.

При разработке математической модели приняты следующие допущения.

1 Объем воды и парового пространства считается объектом с сосредоточенными параметрами и принимается идеальное перемешивание в объеме.

2 Тепловой емкостью поверхности нагрева пренебрегаем.

3 Паровая среда представляется как идеальный газ.

4 При температуре меньше температуры кипения парообразования не происходит.

5 Потерь тепла через ограждения в окружающую среду не происходит.

6 Температуры воды и пара равны.

7 Удельные теплоемкости воды, пара, газовой смеси постоянны.

8 Давление в камере сгорания постоянно.

Уравнение материального баланса для воды в барабане котлоагрегата имеет вид:

$$\frac{dG_B}{d\tau} = g_B - g_{II}^H, \quad (1)$$

где G_B – масса воды в барабане котла, кг; g_B, g_{II}^H – расходы входящей питающей воды и испаряющегося пара, соответственно, кг/с.

Уравнение энергетического баланса для воды в барабане котла имеет вид:

$$c_B \frac{d(G_B t_B)}{d\tau} = kF(t_k - t_B) + g_B c_B t_B^{BX} - g_{II}^H i_{II}^H, \quad (2)$$

где c_B – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); t_B – температура воды в барабане котла, °C; t_B^{BX} – температура питающей воды, °C; t_k – температура в греющей камере (топке), °C; k – коэффициент теплопередачи через поверхность нагрева, Вт/(м²·°C); F – поверхность теплопередачи, м²; g_{II}^H – расход испаряющегося пара, кг/с; i_{II}^H – удельная энтальпия испаряющегося пара, Дж/кг.

Продифференцируем (2) как сложную функцию и подставим в выражение (1):

$$c_B \frac{d(G_B t_B)}{d\tau} = c_B \frac{dG_B}{d\tau} t_B + c_B G_B \frac{dt_B}{d\tau} = c_B (g_B - g_{II}^H) t_B + c_B G_B \frac{dt_B}{d\tau}.$$

Тогда выражение (2) запишется в виде:

$$c_B G_B \frac{dt_B}{d\tau} = kF(t_K - t_B) - g_B c_B (t_B - t_B^{BX}) - g_{II}^H (i_{II} - c_B t_B).$$

С учетом того, что удельная теплота парообразования λ равна

$$\lambda = i_{II} - c_B t_B,$$

уравнение энергетического баланса для воды в барабане запишется в виде:

$$c_B G_B \frac{dt_B}{d\tau} = kF(t_K - t_B) - g_B c_B (t_B - t_B^{BX}) - g_{II}^H \lambda. \quad (3)$$

Уравнение материального баланса для пара в котле имеет вид:

$$\frac{dG_{II}}{d\tau} = g_{II}^H - g_{II}, \quad (4)$$

где G_{II} – масса пара в паровом пространстве, кг; g_{II} – расход отбираемого пара, кг/с.

Согласно принятым допущениям пар подчиняется закону идеального газа Менделеева–Клапейрона.

$$pV_{II} = \frac{G_{II}}{M} R (t_B + 273), \quad (5)$$

где p – давление пара в котле, Па; V_{II} – объем парового пространства, м³; M – молярная масса воды; R – универсальная газовая постоянная.

Объем парового пространства связан с объемом (или массой воды) в котле соотношением:

$$V_{II} = V_0 - V_B = V_0 - \frac{G_B}{\rho_B}, \quad (6)$$

где V_0, V_B – общий объем котла и объем воды в котле, м³; ρ_B – плотность воды, кг/м³.

Температура кипения воды (и температура пара) является функцией давления:

$$t_B = f(p). \quad (7)$$

Зависимость (7) может быть получена в результате аппроксимации табличных данных состояния воды и водяного пара [4].

Расход пара через вентиль может быть описан выражением:

$$g_{II} = \alpha_1 \sqrt{p - p_{\text{пот}}} = \mu_1 \overline{\alpha_1} \sqrt{p - p_{\text{пот}}}, \quad (8)$$

где $\alpha_1, \overline{\alpha_1}$ – текущая и максимальная проводимость вентиля, соответственно; μ_1 – степень открытия вентиля.

Уравнение энергетического баланса для газовой среды в камере сгорания (топке) записывается в виде:

$$c_K G_K \frac{dt_K}{d\tau} = -kF(t_K - t_B) - g_{CM} c_K (t_K - t_{CM}^{BX}) + g_{CM} r, \quad (9)$$

где c_K, G_K – удельная теплоемкость и масса газовой среды в камере сгорания; g_{CM} – расход топлива; r – удельная теплота сгорания топлива.

Тепловая емкость камеры сгорания значительно ниже тепловой емкостью нагреваемой воды, поэтому динамикой изменения температуры в топке t_K можно пренебречь. В результате уравнение (9) запишется в виде:

$$-kF(t_K - t_B) - g_{CM} c_K (t_K - t_{CM}^{BX}) + g_{CM} r = 0. \quad (10)$$

Расход топлива также может быть описан зависимостью

$$g_{cm} = \alpha_2 \sqrt{p_T - p_K} = \mu_2 \overline{\alpha_2} \sqrt{p_T - p_K}, \quad (11)$$

где $\alpha_2, \overline{\alpha_2}$ – текущая и максимальная проводимость вентиля; μ_2 – степень открытия вентиля на линии подачи топлива.

Таким образом, уравнения (1), (3) – (11) представляют собой математическое описание процесса производства пара в котлоагрегате как объекта управления.

4 Имитационные исследования объекта управления

При автоматизации производственных процессов наиболее правильные решения могут быть приняты на основании данных о статических и динамических свойствах регулируемого объекта. Для получения этих данных определяют соответственно статические и динамические характеристики регулируемых объектов, используя математическую модель объекта регулирования.

Статические характеристики представляют собой функциональную зависимость выходных величин от входных при статическом (стационарном, установившемся) режиме работы.

Динамические характеристики представляют собой зависимости между изменениями входных и выходных величин в динамическом режиме (во времени).

Динамические характеристики дают информацию об инерционных свойствах регулируемых объектов (систем, элементов систем) и, таким образом, являются исходными данными при выборе автоматических систем регулирования. Они позволяют выполнить эту работу в полном объеме и завершить ее расчетом параметров настройки регулятора на данном регулируемом объекте с целью получения заданного качества переходных процессов в АСР.

Для проведения анализа чувствительности выходных параметров процесса производства пара на изменение входных параметров, а так же для выбора регулирующих воздействий проведем построение статических характеристик процесса.

Для этого в математической модели (1), (3) – (11) приравняем производные в дифференциальных уравнениях к нулю и получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$g_B - g_{п}^н = 0; \quad (12)$$

$$kF(t_K - t_B) - g_B c_B (t_B - t_B^{BX}) - g_{п}^н \lambda = 0; \quad (13)$$

$$g_{п}^н - g_{п} = 0; \quad (14)$$

$$pV_{п} = \frac{G_{п}}{M} R (t_B + 273); \quad (15)$$

$$V_{п} = V_0 - V_B = V_0 - \frac{G_B}{\rho_B}; \quad (16)$$

$$t_B = f(p); \quad (17)$$

$$g_{п} = \alpha_1 \sqrt{p - p_{пот}} = \mu_1 \overline{\alpha_1} \sqrt{p - p_{пот}}; \quad (18)$$

$$-kF(t_K - t_B) - g_{cm} c_K (t_K - t_{cm}^{BX}) + g_{cm} r = 0; \quad (19)$$

$$g_{cm} = \alpha_2 \sqrt{p_T - p_K} = \mu_2 \overline{\alpha_2} \sqrt{p_T - p_K}. \quad (20)$$

Для получения статических характеристик объекта управления входные воздействия менялись в диапазоне $\pm 20\%$ от своего номинального значения (номинальные значения входных величин приведены в регламенте).

Графики статических характеристик приведены на рис. 3.

Из анализа статических характеристик можно сделать вывод, что давление обладает наибольшей чувствительностью по изменению степеней открытия клапанов на трубопроводах подвода топливной смеси и отбора пара из котлоагрегата. Следовательно, степени открытия клапанов можно использовать в качестве управляющего воздействия. Давление в линии подачи топливной смеси можно считать постоянным. Основным возмущением является давление потребляемого пара, так как чувствительность давления пара в котлоагрегате на изменение этого параметра наибольшая.

5 Расчет АСР давления пара

Структурная схема одноконтурной АСР давления пара представлена на рис. 4.

Помимо собственно объекта регулирования в систему регулирования входят чувствительный элемент (Д), исполнительный механизм с регулирующим органом (ИМ) и регулятор (R). Поэтому в математическое описание АСР входят уравнения, описывающие характеристики датчика, исполнительного механизма и регулятора.

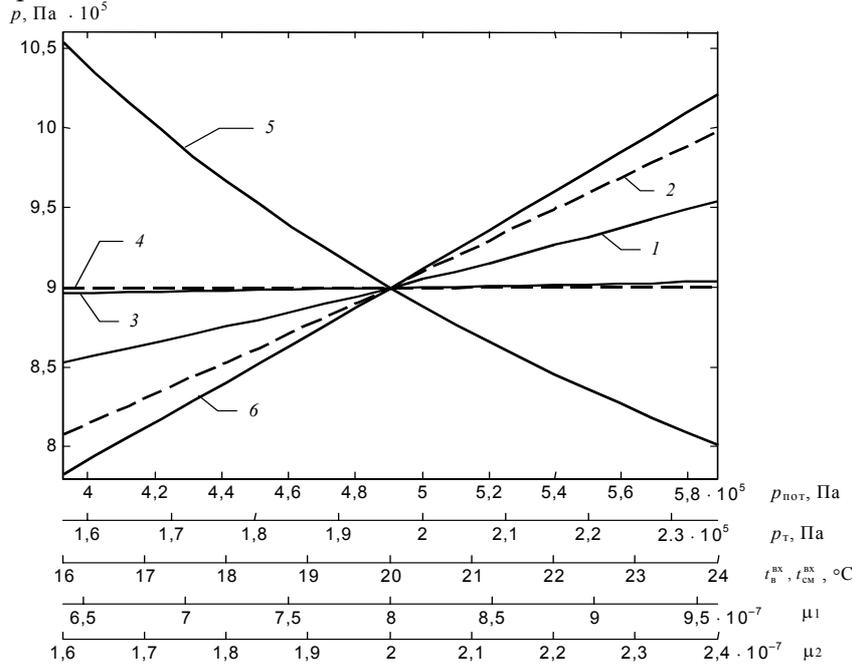


Рис. 3 Статические характеристики котлоагрегата:
 1 – $p(p_{\text{пот}})$; 2 – $p(p_{\text{т}})$; 3 – $p(t_{\text{в}}^{\text{BX}})$; 4 – $p(t_{\text{см}}^{\text{BX}})$; 5 – $p(\mu_1)$; 6 – $p(\mu_2)$

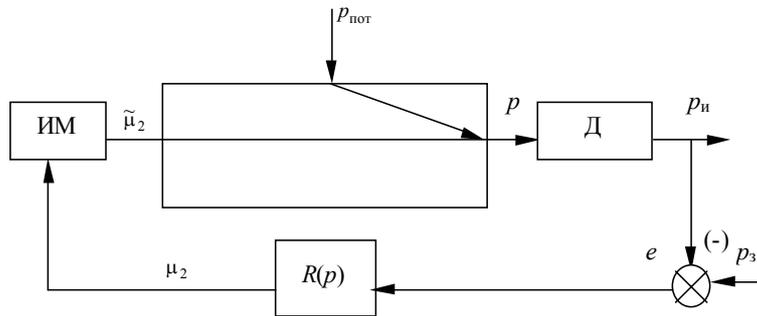


Рис. 4 Структурная схема системы регулирования давления пара:
 x – вход объекта; p – давление – выходная регулируемая величина;
 p_3 – заданное значение температуры; $p_{\text{н}}$ – измеренное значение температуры;
 e – ошибка регулирования

Динамическая характеристика датчика и исполнительного механизма представляются в виде дифференциальных уравнений:

$$T_{\text{д}} \frac{dp_{\text{н}}}{dt} + p_{\text{н}} = p; \quad (21)$$

$$T_{\text{им}} \frac{d\tilde{\mu}_2}{d\tau} + \tilde{\mu}_2 = \mu_2, \quad (22)$$

где T_d – постоянные времени датчика давления и исполнительного механизма, с; p_n – измеряемое давление, Па; $\tilde{\mu}_2$ – реальная степень открытия вентиля на линии подачи топлива.

Постоянные времени используемого датчика давления $T_d = 0,5$ мин, а исполнительного механизма $T_{\text{им}} = 1$ мин.

Расчет одноконтурной АСР заключается в определении настроечных параметров функции $R_1(p)$. В практике автоматизации промышленных объектов широкое распространение получили ПИ-регуляторы. Для регулирования давления в котлоагрегате уравнение ПИ-регулятора имеет вид:

$$\mu_2 = \mu_2^{\text{НОМ}} + K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e d\tau \right), \quad (23)$$

где K_p , T_i – параметры настройки регулятора; e – ошибка регулирования.

Ошибка регулирования определяется как разница между заданным значением и текущим значением измеренного давления в котлоагрегате:

$$e = p_3 - p_n.$$

При заданном законе регулирования расчет одноконтурной АСР сводится к определению оптимальных (с точки зрения какого-либо критерия качества) настроечных параметров регулятора с учетом выполнения ограничения на запас устойчивости системы.

Наиболее часто в качестве критерия качества используется интегральный квадратичный критерий при ограничении на степень затухания:

$$I = \int_0^{\tau_{\text{кон}}} e^2 d\tau \rightarrow \min_{K_p, T_i},$$

где $\tau_{\text{кон}}$ – время регулирования.

Таким образом, математическая модель одноконтурной системы регулирования давления пара в котлоагрегате имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dG_B}{d\tau} &= g_B - g_n; & \frac{dG_n}{d\tau} &= g_n - g_n; \\ c_B G_B \frac{dt_B}{d\tau} &= kF(t_k - t_B) - g_B c_B (t_B - t_B^{\text{BX}}) - g_n \lambda; \end{aligned}$$

$$pV_n = \frac{G_n}{M} R(t_B + 273); \quad V_n = V_o - V_B = V_o - \frac{G_B}{\rho_B}; \quad t_B = f(p);$$

$$g_n = \alpha_1 \sqrt{p - p_{\text{пот}}} = \mu_1 \alpha_1 \sqrt{p - p_{\text{пот}}};$$

$$-kF(t_k - t_B) - g_{\text{CM}} c_k (t_k - t_{\text{CM}}^{\text{BX}}) + g_{\text{CM}} r = 0;$$

$$g_{\text{CM}} = \alpha_2 \sqrt{p_T - p_K} = \mu_2 \alpha_2 \sqrt{p_T - p_K};$$

$$T_d \frac{dp_n}{d\tau} + p_n = p; \quad T_{\text{им}} \frac{d\tilde{\mu}_2}{d\tau} + \tilde{\mu}_2 = \mu_2;$$

$$e = p_3 - p_n; \quad \mu_2 = \mu_2^{\text{НОМ}} + K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e d\tau \right).$$

На рис. 5, 6 показаны графики переходных процессов в одноконтурной АСР при оптимальных настройках. При этом задание регулятору давления пара в парогенераторе изменялось с $8,995 \cdot 10^5$ Па до $9,995 \cdot 10^5$ Па. По каналу возмущения – давление пара в линии потребления изменялось с $4,905 \cdot 10^5$ Па до $6,867 \cdot 10^5$ Па.

6 Качественные показатели переходных процессов в АСР

Качество регулирования численно может быть охарактеризовано прямыми показателями качества, которые определяются непосредственно из графиков переходных процессов АСР [5].

В табл. 1 сведены прямые показатели качества процесса регулирования в АСР (с ПИ регулятором).

Таблица 1

Внешнее воздействие	$t_{\text{пер}}, \text{с}$	ξ	X_M	ψ
Возмущение	420	–	0,1	0,86
Изменение задания	350	0,035	–	0,91

Таким образом, применение одноконтурной АСР для регулирования давления генерируемого пара обеспечивает достижение требуемых качественных показателей (степени затухания ψ и перерегулирования ξ) процесса регулирования [5]. Поэтому при автоматизации рекомендуется использовать одноконтурные АСР давления с ПИ-законом регулирования.

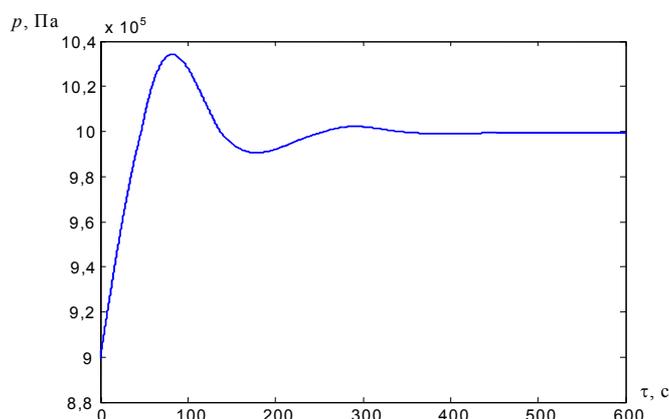


РИС. 5 ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В АСР ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЗАДАНИЯ

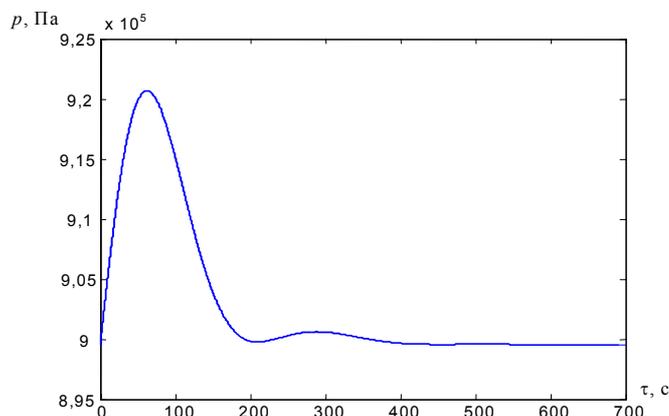


РИС. 6 ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В АСР ПРИ ДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩЕНИЯ

Выводы

- 1 Проведенный анализ процесса производства пара как объекта управления позволил обосновать выбор выходных, регулирующих и возмущающих воздействий.
- 2 Для проведения имитационного исследования технологического процесса построена математическая модель процесса производства пара в котлоагрегате.
- 3 Анализ статических и динамических характеристик технологического процесса позволил выявить основные регулирующие и возмущающие воздействия.
- 4 Проведен расчет АСР давления пара в котлоагрегате.

Список используемых источников

- 1 Установка для генерации пара Е-1,6 ГН: Инструкция по эксплуатации.
- 2 Молчанов Н.А. Эксплуатация паровых котлов, сосудов и грузоподъемных машин. Киев: Техника, 1967. 786 с.
- 3 Файерштейн Л.М., Эпинген Л.С., Гохбойт Г.Г. Справочник по автоматизации котельных. М.: Энергия, 1972. 360 с.
- 4 Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара (таблицы и диаграммы). М.: Стандарты, 1969.
- 5 Автоматизация технологических процессов отрасли: Лаб. работы / Сост.: В.Г. Матвейкин, С.В. Фролов, И.А. Елизаров. Тамбов: ТГТУ, 1995. 44 с.

ПРИМЕР 2

Разработать систему управления процессом производства смолы Э-41. Описание технологического процесса производства смолы Э-41 приведено в технологическом регламенте [1].

1 Анализ процесса производства пара как объекта управления

Себестоимость и качество выпускаемой продукции всегда существенно зависят от выполнения наиболее сложных, энерго- и трудоемких процессов. Исходя из технологического регламента, таким процессом в производстве смолы Э-41 является процесс сополимеризации в химическом реакторе.

Для выбора режимов работы, построения системы автоматического регулирования процессами, протекающими в реакторе, необходимо провести анализ входных и выходных потоков и получить математическое описание объекта управления.

На рис. 1 представлена схема реактора, в котором протекает процесс сополимеризации смолы Э-40 и дифенилопропана (ДФП). Химический реактор, предназначенный для проведения реакции сополимеризации, представляет собой вертикальный сварной аппарат со сферической крышкой, снабженный рамной мешалкой и паровой рубашкой.

Основной выходной величиной является концентрация смолы Э-41 на выходе из аппарата, но измерения данного параметра возможно только лабораторным путем. Анализ литературных источников [1 – 5] и опыт промышленной эксплуатации показали, что для получения смолы Э-41 заданного качества, необходимо поддерживать определенный температурный режим. Поэтому, в качестве выходного параметра выбирается температура смеси t_c .

Входными воздействиями в процессе производства смолы являются расход пара F_n и температура греющего пара t_n , начальная температура в рубашке t_{n0} и реакторе t_{c0} , начальная концентрации компонентов смеси, т.е. смолы Э-40 x_{10} , ДФП x_{20} (рис. 2).

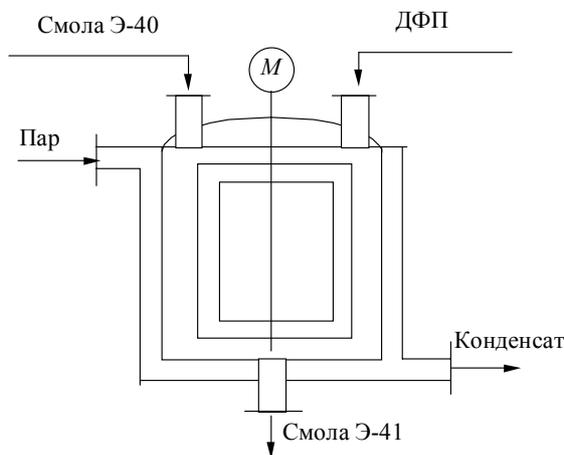


Рис. 1 Схема реактора для сополимеризации смолы Э-40 и дифенилопропана (ДФП)

В качестве регулирующего воздействия может быть выбран расход греющего пара, а остальные воздействия являются возмущающими.

Основным возмущающим воздействием является давление греющего пара.

Процесс сополимеризации смолы Э-40 и ДФП характеризуется следующей особенностью – периодическим характером, исключающим статические режимы производства готовой смолы и автоматизации его только на базе систем стабилизации.

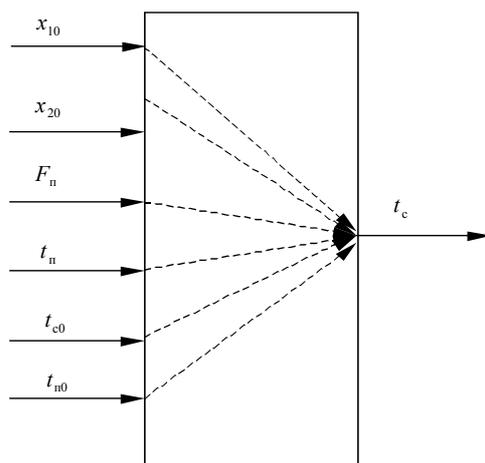


Рис. 2 Связь между входными и выходными параметрами
2 Постановка задач автоматизации

На основании проведенного анализа процесса производства смолы температуры смеси на выходе из аппарата по заданному температурному графику за счет изменения расхода пара.

3 Математическая модель объекта управления

В соответствии с регламентом целью проведения стадии сополимеризации является получение смолы Э-41 с заданной концентрацией. Концентрация смолы Э-41 в реакторе зависит в основном от времени и температуры смеси во время реакции. Для разработки автоматической системы программного регулирования необходимо получить модель, описывающую изменение температуры в смеси под влиянием наиболее существенных факторов.

При разработке ММ стадии сополимеризации приняты следующие допущения.

1 Реактор и парожидкостная рубашка являются объектами с сосредоточенными параметрами и принимается идеальное перемешивание в объеме.

2 Константа скорости химической реакции подчиняется уравнению Арениуса.

3 Удельные теплоемкости воды, пара, смолы Э-40, ДФП и смолы Э-41 постоянны.

Тогда уравнение материального баланса для парожидкостного объема рубашки записывается следующим образом:

$$F_{\text{п}} = F_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{п}}$ – расход греющего пара, кг/с; $F_{\text{в}}$ – расход конденсата, кг/с.

Уравнение теплового баланса для паровой рубашки записывается в виде:

$$\frac{dH_{\text{в}}}{d\tau} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{в}} - Q_1; \quad H_{\text{в}}(0) = H_{\text{в}}^0, \quad (2)$$

где $Q_{\text{п}}$ – поток тепла приходящий в рубашку с греющим паром, Дж/с; $Q_{\text{в}}$ – поток тепла уходящий из системы с конденсатом, Дж/с; $H_{\text{в}}$ – теплосодержание воды находящейся в рубашке, Дж; Q_1 – поток тепла уходящий из рубашки на нагрев смеси, Дж/с; $H_{\text{в}}^0$ – начальное теплосодержание воды в рубашке, °С.

Величины $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{в}}$ определяются в виде:

$$Q_{\text{п}} = F_{\text{п}}h_{\text{п}}; \quad Q_{\text{в}} = F_{\text{в}}h_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{п}}$, $h_{\text{в}}$ – удельная энтальпия соответственно греющего пара и конденсата в рубашке, Дж/кг.

Удельная энтальпия насыщенного пара $h_{\text{п}}$ и воды $h_{\text{в}}$ определяются по формулам:

$$h_{\text{п}} = c_{\text{в}}t_{\text{п}} + r_{\text{п}}; \quad h_{\text{в}} = c_{\text{в}}t_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{п}}$, $t_{\text{в}}$ – температура соответственно греющего пара и воды в рубашке, °С; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, Дж/кг·°С; $r_{\text{п}}$ – теплота парообразования, Дж/кг.

Теплота парообразования $r_{\text{п}}$ существенно зависит от температуры пара, поэтому для вычисления с незначительной погрешностью значения $h_{\text{п}}$ можно воспользоваться следующей формулой:

$$h_{\text{п}} = c_{\text{п}}t_{\text{п}} + r_{\text{п}}^0, \quad (5)$$

где $c_{\text{п}}$ – теплоемкость водяного пара, Дж/кг·°С; $r_{\text{п}}^0$ – теплота парообразования при нулевой температуре, Дж/кг.

Величина Q_1 находится в виде:

$$Q_1 = SK (t_{\text{в}} - t_{\text{с}}), \quad (6)$$

где S – площадь поверхности теплообмена, м²; K – коэффициент теплопередачи, Дж/м²·°С; $t_{\text{с}}$ – температура смеси в реакторе, °С.

Энтальпия воды в рубашке $H_{\text{в}}$ определяется следующим образом:

$$H_{\text{в}} = h_{\text{в}}M_{\text{в}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{в}}$ – масса воды в рубашке, кг.

Исходя из допущения, что рубашка полностью заполнена конденсатом, величина $M_{\text{в}}$ находится в виде:

$$M_{\text{в}} = \rho_{\text{в}}V_{\text{в}}, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды в рубашке, кг/м³; $V_{\text{в}}$ – парожидкостной объем рубашки, м³.

С учетом формул (3) – (8), а также допущения о постоянстве величин $\rho_{\text{в}}$ и $c_{\text{в}}$, уравнение (2) запишется следующим образом:

$$c_{\text{в}}\rho_{\text{в}}V_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} = F_{\text{п}}(c_{\text{п}}t_{\text{п}} + r_{\text{п}}^0) - F_{\text{в}}c_{\text{в}}t_{\text{в}} - SK (t_{\text{в}} - t_{\text{с}}), \quad t_{\text{в}}(0) = t_{\text{в}}^0,$$

или с учетом (1) и несложных преобразований:

$$\frac{dt_B}{d\tau} = (F_{II}(c_{II}t_{II} + r_{II}^0 - c_B t_B) - SK(t_B - t_c)) / (c_B \rho_B V_B), \quad t_B(0) = t_B^0, \quad (9)$$

где t_B^0 – начальная температура воды в рубашке, °С.

Уравнение материального баланса по смоле Э-40 записывается в виде:

$$\frac{d(M_c x_1)}{d\tau} = -K_1 M_c x_1 x_2; \quad M_c(0)x_1(0) = M_{c0}x_{10}, \quad (10)$$

где K_1 – константа скорости химической реакции; M_c – масса реакционной смеси, м³; x_1 – концентрация смолы Э-40 в смеси, кг/м³; x_2 – концентрацияДФП в смеси, кг/м³; M_{c0} – начальное значение массы реакционной смеси, м³; x_{10} – начальное значение концентрации смолы, кг/м³.

Константа скорости химической реакции может быть определена из уравнения Арениуса:

$$K_1 = K_{10} e^{-\frac{E_0}{R(t_c + 273)}}, \quad (11)$$

где E_0 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; t_c – температура смеси, °С; K_{10} – предэкспоненциальный множитель.

Уравнение материального баланса поДФП записывается в виде:

$$\frac{d(M_c x_2)}{d\tau} = -K_1 M_c x_1 x_2; \quad M_c(0)x_2(0) = M_{c0}x_{20}, \quad (12)$$

где x_{20} – начальное значение концентрацииДФП, кг/м³.

Уравнение материального баланса по смоле Э-41 записывается в виде:

$$\frac{d(M_c x_3)}{d\tau} = 2K_1 M_c x_1 x_2, \quad M_c(0)x_3(0) = M_{c0}x_{30}, \quad (13)$$

где x_{30} – начальное значение концентрации смолы Э-41, кг/м³.

Масса смеси в реакторе M_c остается неизменной

Тогда после несложных преобразований, уравнения (10), (12), (13) запишутся в следующем виде:

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -K_{10} e^{-\frac{E_0}{R(t_c + 273)}} x_1 x_2, \quad x_1(0) = x_{10}; \quad (14)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} = -2K_{10} e^{-\frac{E_0}{R(t_c + 273)}} x_1 x_2^2, \quad x_2(0) = x_{20}; \quad (15)$$

$$\frac{dx_3}{d\tau} = 2K_{10} e^{-\frac{E_0}{R(t_c + 273)}} x_1 x_2, \quad x_3(0) = x_{30}. \quad (16)$$

Изменение внутренней энергии реакционной смеси происходит за счет передачи тепла через поверхность нагрева от греющего пара, расхода теплоты в результате химической реакции.

Уравнение энергетического баланса для рабочего объема реактора записывается в виде:

$$\frac{dH_c}{d\tau} = Q_1 - Q_x; \quad (17)$$

$$H_c(0) = H_c^0,$$

где H_c – энтальпия смеси в реакторе, Дж; H_c^0 – начальная энтальпия смеси в реакторе, Дж; Q_x – расхода теплоты на проведение химической реакции, Дж/с.

Величина Q_x определяется по формуле:

$$Q_x = 2K_1 M x_1 x_2^2 \Delta H, \quad (21)$$

где ΔH – тепловой эффект реакции, Дж/кг.

Величина H_c определяется следующим образом:

$$H_c = M_c c_c t_c, \quad (22)$$

где c_c – теплоемкость смеси в реакторе, Дж/кг·°С.

Теплоемкость смеси c_c находится по формуле:

$$c_c = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3}{x_1 + x_2 + x_3},$$

где c_1, c_2, c_3 – массовая теплоемкость соответственно смолы Э-40, ДФП и смолы Э-41, Дж/кг.

Тогда уравнение (20) запишется в следующем виде:

$$\frac{dt_c}{d\tau} = \left(S_1 r_1 (t_n - t_c) - 2K_{10} e^{\frac{E_0}{R(t_c + 273)}} x_1 x_2 \Delta H \right) / (M_c c_c), \quad (23)$$

$$t_c(0) = t_c^0,$$

где t_c^0 – начальная температура смеси в реакторе, °С.

Теплофизические параметры $c_b, c_n, r_n^0, c_1, c_2, c_3, E_0, K_{10}, \Delta H$, входящие в уравнения ММ, являются справочными величинами. Величины S_1, V_n являются конструктивными параметрами реактора. Коэффициент теплопередачи r_1 является основным фактором, определяющим интенсивность процессов нагрева и сополимеризации компонентов смеси.

Таким образом, получено математическое описание стадии сополимеризации, что позволяет исследовать свойства объекта с учетом всех сделанных допущений.

4 Имитационные исследования объекта управления

При автоматизации производственных процессов наиболее правильные решения могут быть приняты на основании данных о статических и динамических свойствах регулируемого объекта. Для получения этих данных определяют соответственно статические и динамические характеристики регулируемых объектов, используя математическую модель объекта регулирования.

Статические характеристики представляют собой функциональную зависимость выходных величин от входных при статическом (стационарном, установившемся) режиме работы.

Динамические характеристики представляют собой зависимости между изменениями входных и выходных величин в динамическом режиме (во времени).

Динамические характеристики дают информацию об инерционных свойствах регулируемых объектов (систем, элементов систем) и, таким образом, являются исходными данными при выборе автоматических систем регулирования. Они позволяют выполнить эту работу в полном объеме и завершить ее расчетом параметров настройки регулятора на данном регулируемом объекте с целью получения заданного качества переходных процессов в АСР.

Для получения динамических характеристик объекта управления входные воздействия изменялись на 10 %.

Графики динамических характеристик приведены на рис. 3.

Из анализа динамических характеристик можно сделать вывод, что температура обладает наибольшей чувствительностью по изменению расхода пара.

5 Расчет одноконтурной АСР температуры смеси в реакторе

Структурная схема одноконтурной АСР давления пара представлена на рис. 4.

Расчет одноконтурной АСР заключается в определении структуры регулирующего устройства и подборе настроечных параметров функции. В практике автоматизации промышленных объектов широ-

кое распространение получили ПИ-регуляторы. Для регулирования температуры в аппарате уравнение регулятора имеет вид:

$$F_{\text{п}} = F_{\text{п}}^0 + K_{\text{р}} \left(e + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int e d\tau \right), \quad (23)$$

где $K_{\text{р}}$, $T_{\text{и}}$ – параметры настройки регулятора.

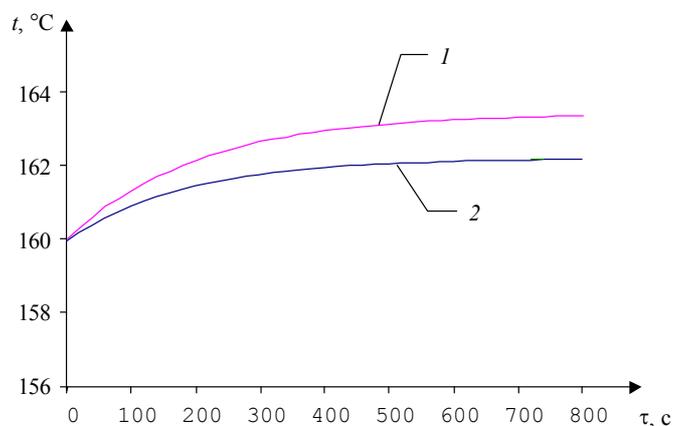


Рис. 3 Графики изменения температуры смеси в реакторе:
 1 – при изменении расхода пара $F_{\text{п}}$ на 10 %;
 2 – при изменении температуры пара $t_{\text{п}}$ на 10 %

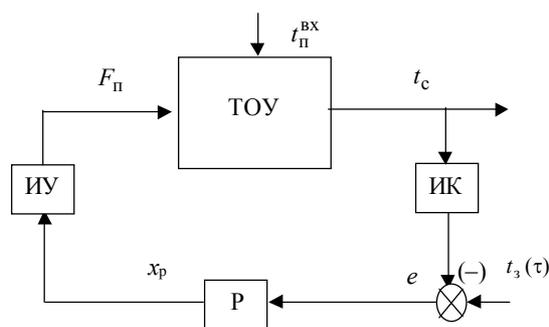


Рис. 4 Структурная схема одноконтурной АСР:
 ТОУ – технологический объект управления; Р – регулятор;
 ИУ – исполнительное устройство; ИК – измерительный канал

При заданной структуре регулятора расчет одноконтурной АСР сводится к определению оптимальных (с точки зрения какого-либо критерия качества) настроечных параметров регулятора, с учетом выполнения ограничения на запас устойчивости системы.

Наиболее часто в качестве критерия качества используется интегральный квадратичный критерий:

$$I = \int e^2 d\tau \rightarrow \min_{K_{\text{р}}, T_{\text{и}}},$$

где e – ошибка регулирования (определяется как разница между заданным значением и текущим значением температуры):

$$e = t_3 - t_c.$$

Оптимальные настроечные параметры $k_{\text{р}}^*$, $T_{\text{и}}^*$ регулятора могут быть найдены при минимизации функционала (33) по параметрам $k_{\text{р}}$, $T_{\text{и}}$.

При проведении цикла оптимизации получены следующие значения параметров регулятора:

$$k_{\text{р}}^* = 0,12 \text{ кг/с } ^\circ\text{C}; \quad T_{\text{и}}^* = 123,696 \text{ с.}$$

На рис. 5 представлен график изменения температуры в одноконтурной АСР при отработке программы.

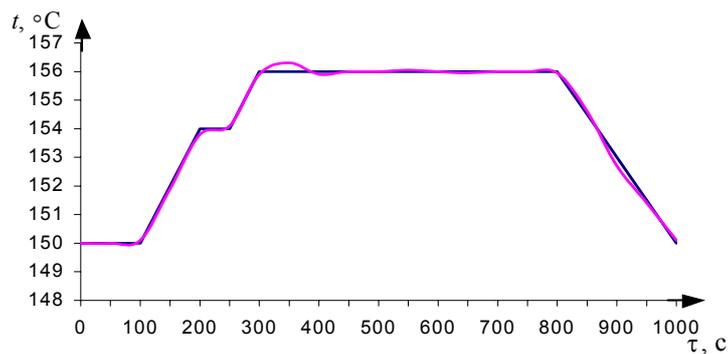


Рис. 5 График изменения температуры смеси в одноконтурной АСР

при отработке программы

Выводы

- 1 Построена математическая модель динамики процесса.
- 2 Проведен анализ процесса с точки зрения управления.
- 3 Проведен расчет одноконтурной АСР температуры с ПИ-регулятором.

Список используемых источников

- 1 Производство смолы Э-41. Регламент технологический.
- 2 Благоднарова А.А., Непомнящий А.И. Лаковые эпоксидные смолы. М.: Химия, 1970. 248 с.
- 3 Волчек И.С. Автоматизация производственных поликонденсационных смол. М.: Химия, 1976. 279 с.
- 4 Голдинг Б. Химия и технология полимеров. М.: Издательство, 1973. 357 с.
- 5 Жебровский В.В. Технология синтетических смол, применяемых для производства лаков и красок. М.: Высшая школа, 1968. 128 с.