

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ
С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ****FEATURES OF CONSTRUCTING A DYNAMIC MODEL OF TEMPERATURE CONTROL SYSTEM
IN A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER WITH A PROPORTIONAL REGULATOR**

Ключевые слова: *устойчивость системы автоматического управления, жидкостно-паровой теплообменник, пропорциональный регулятор.*

Рассмотрены вопросы оценки динамических свойств в системе автоматического управления (САУ) температуры в жидкостно-паровых теплообменниках с пропорциональными (П) регуляторами с учетом показателей динамической модели и спецификой автоматизации технологических процессов. Для определения характеристик динамики САУ предложена методика определения математической модели по переходной функции. В инженерной практике исследования динамики в системах автоматизированного управления в основном используются частотные критерии по показателям передаточных функций разомкнутой системы по критериям Найквиста позволяющие адекватно оценить устойчивость замкнутой САУ. В работе проведен анализ системы управления температурой в кожухотрубном теплообменнике и составлена математическая модель системы на основе экспериментально-полученной переходной функции. Использована типовая схема автоматизации кожухотрубного парового теплообменника, как зависимость температуры жидкости в трубах объекта от давления пара, или с учетом контура управления как функция, где положение штока клапана пара в процентах его хода. Составлена схема испытания на основе прибора «Термодат» с термопарным датчиком. Эксперимент проведен на второй секции теплообменника парового пастеризатора молока в режиме холостого хода. Экспериментально получены значения кривой разгона и зависимость изменения температуры молока от положения клапана пара. Полученные данные позволяют определить характер кривой разгона и коэффициенты переходной. По кривой разгона идентифицированы динамические свойства объекта как передаточная функция инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Согласно составленной структурной схемы контура управления выражена передаточная функция САУ с пропорциональным регулятором в разомкнутой состоянии. В результате проведенных исследований получены основные величины для исследования устойчивости системы автоматического управления и выбора показателей настройки

пропорционального регулятора для получения оптимального процесса управления.

Keywords: *automatic control system stability, steam-to-fluid heat exchanger, proportional controller.*

The issues of evaluation of dynamic properties in the automatic control system (ACS) of temperature in steam-to-fluid heat exchangers with proportional (P) controllers are considered taking into account the indices of the dynamic model and the specifics of automation of technological processes. To determine the characteristics of the dynamics of the ACS, a method for determining the mathematical model by the transition function is proposed. In the engineering practice of studying dynamics in automated control systems, frequency criteria are mainly used in terms of the transfer functions of an open system according to the Nyquist criteria which allow adequate assessment of closed ACS stability. This paper analyzes the temperature control system in a shell-and-tube heat exchanger and composes a mathematical model of the system based on the experimentally obtained transition function. A typical automation scheme of a shell-and-tube steam heat exchanger is used as a dependence of the temperature of the liquid in the pipes of the object on the steam pressure, or taking into account the control circuit as a function where the position of the steam valve stem as a percentage of its stroke. The test scheme is based on the device "Termodat" with a thermocouple sensor. The experiment was carried out on the second section of the milk steam pasteurizer heat exchanger in idle mode. The values of the acceleration curve and the dependence of the milk temperature change on the position of the steam valve were experimentally obtained. The data obtained will allow determining the nature of the acceleration curve and the transition coefficients. According to the acceleration curve, the dynamic properties of the object are identified as a transfer function of the first-order inertial link with a delay. According to the compiled block diagram of the control circuit, the transfer function of the ACS with a proportional controller in the open state is expressed. As a result of the conducted research, the main values for the study of the stability of the automatic control system and the selection of parameters for setting the proportional controller to obtain the optimal control process were obtained.

Калинин Цезарь Иванович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kalinin_vezar@mail.ru.

Куницын Роман Александрович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kynizin_roman@mail.ru.

Kalinin Tsezar Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kalinin_vezar@mail.ru.

Kunitsyn Roman Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kynizin_roman@mail.ru.

Введение

Основным назначением САУ является поддержание заданного значения регулируемого параметра или изменение по определенному закону. Под действием возмущающих воздействий и регулятора на САУ в системах автоматики возникает переходной процесс, определяемый ее динамическими свойствами.

Если САУ после переходного процесса вновь переходит в первоначальное или иное равновесное состояние, то такая система называется устойчивой. Если при аналогичных условиях в системе возникают колебания со всё возрастающей амплитудой или происходит монотонное увеличение параметра от заданного значения, то система называется неустойчивой.

При описании динамических свойств системы дифференциальными уравнениями математический анализ устойчивости сводится к исследованию свойств при помощи решения этих уравнений. Математические условия устойчивости систем представляет собой требования обращения в нуль свободного движения системы, то есть необходимо и достаточно, чтобы корни дифференциального уравнения системы находились в комплексной плоскости слева от линии оси, либо коэффициенты характеристического уравнения отвечали определенным требованиям [1].

Однако составление дифференциальных уравнений динамики систем и их решение является весьма трудоемкой задачей и практически не используется в инженерной практике [2].

Наибольшее применение нашли частотные критерии устойчивости, которые позволяют на основе частотных характеристик системы (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A=f(\omega)$, фазочастотная характеристика (ФЧХ) $\phi=f(\omega)$, амплитуднофазочастотная характеристика (АФЧХ) $\psi=f(\omega)$), определить показатели устойчивости САУ на основе критерия Найквиста, который позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по передаточной функции разомкнутой САУ, анализ устойчивости можно выполнить и по экспериментально определен-

ными частотными характеристиками. С помощью частотных характеристик можно судить о запасе устойчивости и о качестве переходных процессов в САУ на основе простых графических методов исследования [3].

Целью работы является разработка математической модели системы автоматики с пропорциональным регулятором для последующего исследования устойчивости.

Задачи исследования:

- провести анализ работы контура регулирования температуры в жидкостно-паровом теплообменнике;
- исследование динамики системы для получения переходных функций;
- составление структурной схемы контура регулирования температуры с пропорциональным регулятором и выражение передаточной функции системы автоматики в разомкнутом состоянии.

Объекты и методы

Объектом исследования является кожухотрубный теплообменник, в котором процесс передачи тепла происходит через стенки труб. К этому классу относят теплообменники типа «труба в трубе», «кожухотрубчатые», «тепловые конденсаторы» и т.д.

Характерной общей особенностью для всех этих устройств является то, что тепловая емкость на стороне нагреваемого потока и на стороне греющего агента распределена равномерно по всей длине теплообменника.

Рассмотрим теплообменник, у которого по трубам протекает жидкость, а на наружной поверхности труб происходит конденсация пара. Общий вид теплообменника показан на рисунке 1 [2].

Обычно температура жидкости на выходе теплообменника однозначно определяется давлением пара (P_n), и основным регулирующим воздействием является зависимость температуры жидкости на выходе от величины давления (величины поступления) подаваемого пара в теплообменник, то есть $t_{\text{ж}}^0=f(P_n)$.

Экспериментальная часть

Если тепловая емкость нагревательных трубок пренебрежительно мала, то система может быть приближенно описана передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием [4]:

$$W_0(S) = \frac{K_0}{T_0 S + 1} \times e^{-\tau_0 S}, \quad (1)$$

где $\frac{K_0}{T_0 S + 1}$ – передаточная функция инерционного звена;

$e^{-\tau_0 S}$ – передаточная функция звена емкостного запаздывания;

K_0 – коэффициент передачи;

T_0 – постоянная инерции;

τ_0 – время запаздывания;

S – оператор Лапласа.

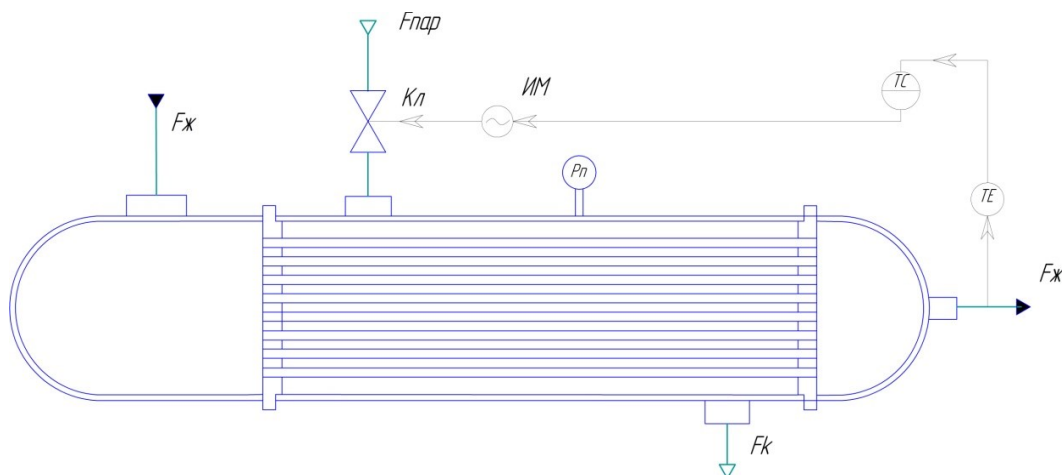


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизации кожухотрубчатого паро-водного теплообменника:
Fж – поток нагреваемой жидкости; *Fпар* – поток подаваемого пара; *Pн* – давление пара;
ТЕ – температура жидкости на выходе; *ТС* – регулятор нагрева; *ИМ* – исполнительный механизм;
Кл – клапан линии пара; *Fк* – сброс конденсата

Для упрощения предположим, что температура кожуха и труб совпадает с температурой пара. Примем также, что передача тепловой энергии паром жидкости в трубах пропорциональна среднеарифметическому значению температурного напора. Расход пара полностью определяется положением штока клапана подачи пара, тогда расходная характеристика имеет вид:

$$t_{ж.}^0 = f(h_n \%), \quad (2)$$

где $h_n(\%)$ – положение штока клапана в процентах его хода.

Коэффициенты передаточной функции объекта определены экспериментально из кривой

разгона $t^0 = f(h_n \%)$ и составляют $K_0 = 6$, $T_0 = 6$ с, $\tau_0 = 0,6$ с [5].

Общие уравнения переходного процесса в замкнутой САУ могут быть получены в результате алгебраических операций по правилам преобразования структурных схем автоматики над сигналами и передаточными функциями, представленными на структурной схеме системы [4]. На рисунке 2 представлена одноконтурная структурная схема рабочего контура регулирования, в которой стабилизировано внешнее воздействие, а инерцией измерительного элемента вследствие малой величины можно пренебречь [6, 7].

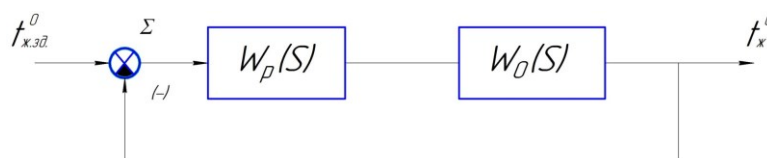


Рис. 2. Структурная схема замкнутой САУ рабочего контура:
W0(S) – передаточная функция объекта при стабильной нагрузке;
Wp(S) – передаточная функция регулятора; Σ – сумматор сигналов обратной связи и сигнала задания; $t_{ж.зд.}^0$ – заданная температура жидкости ($t_{ж.зд.}^0 = const$);
 $t_{ж.}^0$ – температура жидкости на выходе системы

Рассмотрим случай расчета показателей устойчивости в системе, состоящей из заданного объекта представленной его передаточной функцией $W_0(S)$ и пропорционального регулятора.

Пропорциональные регуляторы воздействуют на регулирующий орган пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения [6]:

$$y = k_p x, \quad (3)$$

где y – воздействие регулятора;

x – регулируемая величина;

k_p – коэффициент пропорциональности (передачи).

Обычно коэффициент пропорциональности k_p представляют в виде относительной величины пределов пропорциональности σ_p , обратной k_p . Например, при $k_p=20$ $\sigma_p=100\%/20=5\%$, показывающим, какому отклонению регулируемой величины в процентах соответствует перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое (в данном случае отклонение регулируемой величины x на 5% приводит к полному перемещению регулирующего органа).

Переходная характеристика пропорционального регулятора аналогична переходной характеристике усилительного звена, а передаточная функция имеет вид:

$$W_p(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = -K_p. \quad (4)$$

Пропорциональные регуляторы могут применяться для объектов с самовыравниванием и без самовыравнивания, но при наличии остаточного отклонения (Δx) регулируемой величины. Увеличивая k_p (то есть уменьшая σ_p), можно уменьшить остаточное отклонение, однако полностью его устранить его невозможно, при этом уменьшается устойчивость САУ. Из чего следует определять k_p для создания необходимого запаса устойчивости [3].

Для исследования устойчивости примем $K_p=2$.

В одноконтурной системе автоматики нет местных обратных связей, имеется только один замкнутый контур, образованный с помощью главной обратной связи.

Для определения передаточной функции в разомкнутом состоянии размыкают систему путем разрыва обратной связи, разомкнутая САУ показана на рисунке 3.



Рис. 3. Система управления в разомкнутом состоянии

Видно, что САУ в разомкнутом состоянии состоит из последовательно соединенных звеньев, и ее передаточная функция ($W_c(S)$) равна произведению передаточных функций звеньев системы [4]:

$$W_c(S) = W_p(S) \times W_0(S), \quad (5)$$

где $W_p(S)$ – передаточная функция регулятора;

$W_0(S)$ – передаточная функция объекта.

Результаты исследований и их обсуждение

После подстановки в формулу (3) значений передаточных функций элементов получим:

$$W_c(S) = K_p \times \frac{K_0 e^{-\tau_0 S}}{T_0 S + 1}, \quad (6)$$

где $K_p(S)$ – передаточная функция пропорционального регулятора;

$\frac{K_0}{T_0 S + 1}$ – передаточная функция инерционного звена объекта;

$e^{-\tau_0 S}$ – передаточная функция звена запаздывания.

С учетом полученных коэффициентов передаточная функция системы в разомкнутом состоянии имеет вид:

$$W_c(S) = \frac{6e^{-0,6S}}{6S+1} \times 2 = \frac{12e^{-0,6S}}{6S+1}. \quad (7)$$

Выводы

1. С учетом технологических свойств объекта – парового кожухотрубного теплообменника составлена математическая модель динамики в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием.

2. Рассмотрена работа контура регулирования температуры жидкости в паровом кожухотрубном теплообменнике и выбрана основная зависимость $t_{ж.}^0 = f(h_{п} \%)$.

3. Экспериментальным путем получена кривая разгона и определены коэффициенты математической модели в виде передаточной функции объекта.

4. Рассмотрены устройство и работа пропорционального регулятора, задана его передаточная функция $W_p(S) = 2$.

5. Составлена структурная схема контура регулирования и записана передаточная функция системы в разомкнутом состоянии.

Библиографический список

1. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с. – Текст: непосредственный.

2. Шкатов, Е. Ф. Основы автоматизации технологических процессов химических производств / Е. Ф. Шкатов, В. В. Шувалов. – Москва: Химия, 1988. – 303 с. – Текст: непосредственный.

3. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – Москва: Юрайт, 2017. – 279 с. – Текст: непосредственный.

4. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выща. шк., Головное изд-во, 1989. – 431 с. – Текст: непосредственный.

5. Калинин, Ц. И. Идентификация объектов автоматики с помощью переходной и частотной функций / Ц. И. Калинин, Р. А. Куницын. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 7. – С. 105-110.

6. Дементьев, А. В. Анализ существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом / А. В. Дементьев. – Текст: непосредственный // Студенческий. – 2020. – № 21-1 (107). – С. 30-60.

7. Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов / Н. Н. Иващенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1978. – 736 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Phillips Ch. Sistemy upravleniia s obratnoi sviaziu / Ch. Phillips, R. Harbor. – Moskva: Laboratoriia bazovykh znanii, 2001. – 616 s.

2. Shkatov E. F., Shuvalov V. V. Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov khimicheskikh proizvodstv / E. F. Shkatov, V. V. Shuvalov. – Moskva: Khimiia, 1988. – 303 s.

3. Vostrikov, A. S. Teoriia avtomaticheskogo regulirovaniia: uchebnik i praktikum dlia akademicheskogo bakalavriata / A. S. Vostrikov, G. A. Frantsuzova. – M.: Iurait, 2017. – 279 s.

4. Zaitsev G.F. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia i regulirovaniia 2-e izd., pererab. i dop. – Kiev: Vyshcha shk. Golovnoe izd-vo, 1989. – 431 s.

5. Kalinin Ts.I. Identifikatsiia obiektov avtomatiki s pomoshchiu perekhodnoi i chastotnoi funktsii / Ts.I. Kalinin, R.A. Kunitsyn // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 7. – S. 105-110.

6. Dementev A.V. Analiz sushchestvuiushchikh avtomatizirovannykh sistem upravleniia tekhnologicheskim protsessom // Studencheskii. – 2020. – No. 21-1 (107). – S. 30-60.

7. Ivashchenko N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriia i elementy sistem: uchebnik dlia vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 736 s.

