

УДК 62.533.65

Т.А. Емельянова, В.И. Гончаров, Ю.Н. Дементьев, И.А. Тутов

Синтез двухконтурной системы управления химическим реактором численным методом с привлечением регуляризации

Представлена математическая модель химического реактора для создания термостойкого пластика. Проведен синтез регуляторов системы управления температурой многоконтурной системы автоматического управления на основе вещественного интерполяционного метода. Представлены результаты синтеза регуляторов многоконтурной системы.

Ключевые слова: химический реактор, термостойкий пластик, температура, двухконтурная система автоматического управления, вещественный интерполяционный метод.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-95-99

Технология создания термостойкого пластика предусматривает получение исходного продукта в химическом реакторе, показанном на рис. 1 [1]. Он состоит из двух ёмкостей, помещённых друг в друга. В первую из них загружаются исходные продукты для химической реакции – 1, другая служит водяной рубашкой – 2, которая используется для стабилизации температуры содержимого рабочей камеры. В рубашку поступает холодная и горячая вода, ее расход регулируется соответствующими устройствами – 3. По регламенту температура в рабочей камере должна поддерживаться в жестких пределах. Химическая реакция протекает с выделением тепла. С позиций управления оно является источником возмущения для системы стабилизации температуры [2].

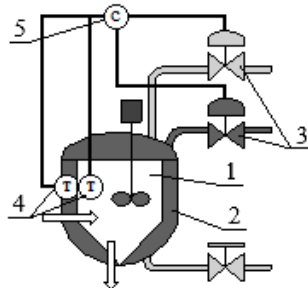


Рис. 1. Схема технологической установки

Будем рассматривать основную часть задачи управления технологическим процессом – управление температурой в рабочей емкости. Запуск системы начинается с загрузки ингредиентов в рабочую емкость, что в последующем приводит к химической реакции с выделением тепла, которое необходимо для разложения исходных веществ. Установлено, что оптимальная температура содержимого в рабочей емкости должно быть около 73 °С. Отклонение от этого значения должны быть сравнительно малым из-за особенностей процесса. В частности, даже кратковременное превышение заданного значения температуры на 7 °С может привести к затвердеванию смеси, что приводит к остановке процесса и значительным экономическим потерям. Вследствие этого перерегулирование в системе должно быть не более 14,5%. В связи с этим целесообразно не допускать такой большой величины перерегулирования.

Предварительные замечания

Анализ технологического процесса показал, что для управления температурой в системе необходимо иметь два контура управления, один – по температуре содержимого рабочей камеры, второй – по температуре водяной рубашки. Известно, что регулирующие клапаны обладают существенными нелинейностями [3]. Математическое описание клапанов представляет самостоятельную задачу и выходит за рамки данной статьи. Для исследовательских целей было принято допущение: регулирующие клапаны представить масштабируемыми передаточными звеньями. Математическая модель такой системы автоматического управления (САУ) получена в [4]. Ее структурная схема представлена на рис. 2.

Обозначения параметров и известные значения некоторых из них: $T=4,3$ с, $k_1=1,2$ и $k_2=5,9$, $m_{p,к}=0,23$ кг, $m_p=0,61$ кг. Значения постоянной времени аperiodического звена нагревателя T , коэффициентов теплопередачи стенок k_1 и k_2 получены экспериментально. Масса жидкости в рабочей камере $m_{p,к}$ и масса воды в водяной рубашке m_p были измерены.

Для выполнения одного из основных требований, предъявляемых к САУ – ограничению перерегулирования по температуре в рабочей камере, необходимо изменять температуру воды в рубашке так, чтобы перерегулирование не выходило за заданный предел. Для достижения цели используется каскадный регулятор, в состав которого входят два ПИ-регулятора. Первый формирует управляющее воздействие для второго регулятора в соответствии с разницей между уставкой и измеренным значением температуры в рабочей камере реактора. Второй формирует управляющее воздействие для исполнительного механизма, который изменяет температуру воды в рубашке в соответствии с разницей между управляющим воздействием первого регулятора и измеренным значением температуры в водяной рубашке.

Выбор закона регулирования представляет самостоятельную и непростую задачу. Она дополнительно осложняется наличием шумов в сигналах, поступающих с датчиков температуры. Прямой путь

фильтрации помех в данных условиях проблематичен, так как возникает задержка сигналов обратной связи, негативно влияющая на свойства системы управления. В то же время необходимо, чтобы регулятор формировал управляющие воздействия, максимально точно соответствуя мгновенным значениям сигналов датчиков обратной связи. Эксперименты и расчеты показали, что применение каскадного управления на основе ПИ-регуляторов рационально в том смысле, что они отвечают компромиссным требованиям.

По указанным причинам повышение точности работы САУ целесообразно осуществлять на этапе синтеза регуляторов, максимально реализуя потенциальные возможности коррекции свойств системы. Эти возможности связаны не столько с выбором метода и тщательностью расчетов, сколько с новым подходом к синтезу САУ, которые имеют несколько контуров управления.

Синтез регуляторов системы управления температурой

Традиционный подход к синтезу многоконтурных систем, в том числе двухконтурных, основан на последовательном расчете контуров, начиная с внутреннего. Несмотря на его простоту в инженерном плане, он не позволяет использовать все потенциальные возможности регуляторов, так как распределение желаемых свойств по контурам осуществляется в значительной степени произвольно [5]. Последнее является дополнительным источником погрешности (кроме этапа собственно синтеза), что при расчете рассматриваемой системы крайне нежелательно. Для устранения этого недостатка в работе решено использовать подход к синтезу двухконтурной САУ на основе вещественного интерполяцион-

ного метода (ВИМ) [6]. Он позволяет решить уравнение синтеза, в которое входят передаточная функция желаемой САУ, получаемая, например, по заданным показателям качества, модель объекта, а также неизвестные передаточные функции регуляторов. Такой подход не требует декомпозиции желаемых свойств САУ по контурам, поэтому не имеет указанного ранее источника дополнительной погрешности и потому потенциально обладает большей точностью.

Известно [6], что применение ВИМ для решения уравнений синтеза многоконтурных САУ возможно, но ограничивается всего лишь двумя-тремя неизвестными коэффициентами. Увеличение числа неизвестных приводит к ухудшению обусловленности. В рассматриваемой задаче имеются два регулятора с общим числом неизвестных коэффициентов четыре. Можно предполагать, что решение едва ли будет найдено без принятия специальных мер, улучшающих обусловленность уравнения синтеза. Такой мерой является привлечение какого-либо метода регуляризации [7, 8].

Структурная схема синтезируемой системы, адаптированная для синтеза регуляторов таким методом, представлена на рис. 3 в виде двухконтурной системы.

По этой схеме получим передаточные функции объектов управления внутреннего и внешнего контуров управления $W_{OY1}(p)$, $W_{OY2}(p)$ и $W_{OY3}(p)$ соответственно:

$$W_{OY1}(p) = \frac{1423,5}{4,3p + 1}; \tag{1}$$

$$W_{OY2}(p) = \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 21981,48p + 7,08}; \tag{2}$$

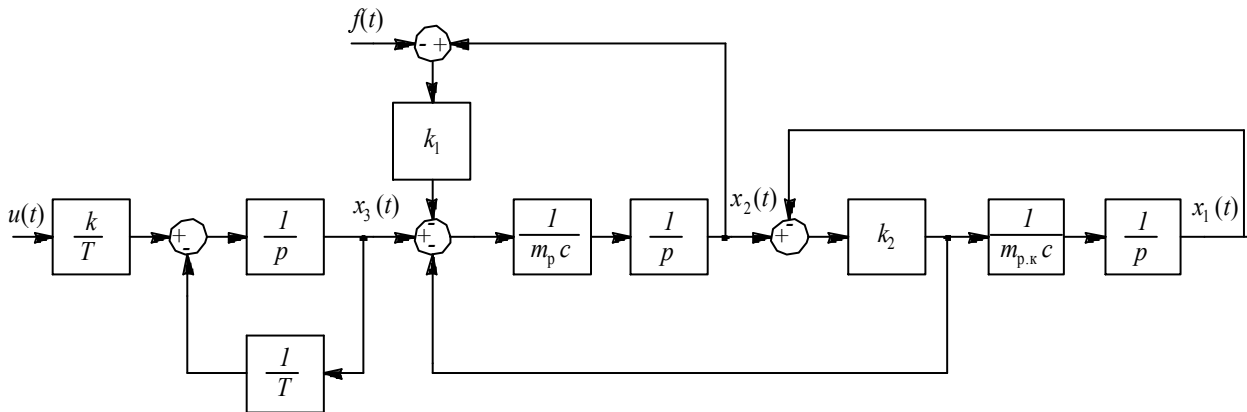


Рис. 2. Структурная схема химического реактора

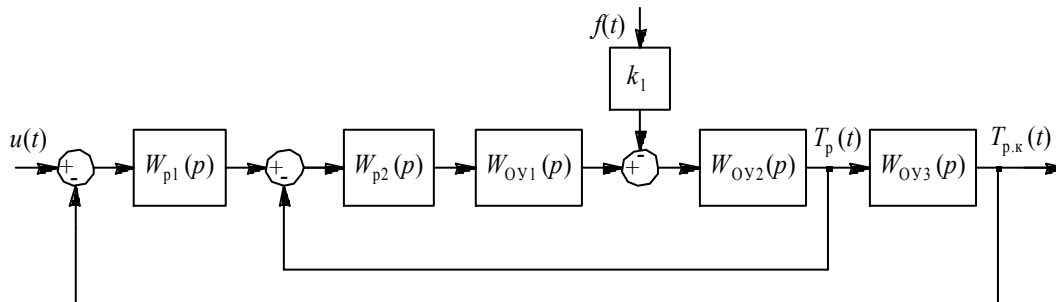


Рис. 3. Структурная схема системы управления

$$W_{Oy3}(p) = \frac{1}{966p}. \quad (3)$$

Передаточные функции регуляторов по условиям задачи имеют вид

$$W_{p1}(p) = K_1 + K_2 \frac{1}{p}; \quad W_{p2}(p) = K_3 + K_4 \frac{1}{p}. \quad (4)$$

Имея представленные данные, составим уравнение синтеза

$$\frac{1}{p} \left(\frac{W_3^*(p)}{W_{Oy3}(p)W_{Oy2}(p)W_{p2}(p)W_{Oy1}(p)W_{p1}(p)} + W_3^*(p) + \frac{W_3^*(p)}{W_{Oy3}(p)W_{p1}(p)} - 1 \right) = \frac{C \cdot k_1}{W_{p2}(p)W_{Oy1}(p)W_{p1}(p)},$$

где $W_3^*(p)$ – передаточная функция желаемой замкнутой системы; C – ненулевые начальные условия по температуре окружающей среды, °С.

После преобразования получаем:

$$\frac{1}{p} \left(W_3^*(p) \left/ \left(\frac{1}{966p} \cdot \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 2198,48p + 7,08} \times \frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p} \right) + \frac{W_3^*(p)}{\frac{1}{966p} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}} + W_3^*(p) - 1 \right) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

Таким образом, имеем уравнение с четырьмя неизвестными параметрами K_1, K_2, K_3, K_4 . В соответствии с методикой ВИМ необходимо определить передаточную функцию желаемой системы, выбрать четыре узла интерполирования, определить численные характеристики объекта управления и желаемой передаточной функции. Затем необходимо найти численные характеристики регуляторов и на их основе составить систему из четырех уравнений. Воспользуемся этой последовательностью.

Начнем с получения передаточной функции желаемой системы. Не останавливаясь подробно на этой части задачи, приведем конечный результат, полученный по методу Коновалова–Оурурка [9] для желаемого времени переходного процесса 1344 с и перерегулирования $\sigma \leq 1\%$.

$$W_3^*(p) = \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1}.$$

В конечном итоге уравнение синтеза принимает вид

$$\frac{1}{p} \left(\frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} \left/ \left(\frac{1}{966p} \times \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 2198,48p + 7,08} \times \frac{K_3p + K_4}{p} \times \frac{1423,5}{4,3p + 1} \times \frac{K_1p + K_2}{p} \right) + \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} + \frac{1}{966p} \times \frac{K_1p + K_2}{p} + W_3^*(p) - 1 \right) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

$$+ \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} - 1 \left) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

Обратим внимание на его важную особенность, которая создает принципиальные препятствия – неизвестные параметры входят в уравнение нелинейно. В результате перехода к системе уравнений по технологии ВИМ и ее решения методом Ньютона работоспособное решение не было получено. Наиболее вероятная причина – некорректность постановки задачи, что требует регуляризации при ее решении. На это указывают неудачные попытки получения подходящего решения при изменениях некоторых исходных данных, в частности начальных приближений в методе Ньютона. Для проверки предположения определим показатель обусловленности матрицы системы уравнений – число обусловленности по норме L2. Получили: $\text{cond2}(R(K_1, K_2, K_3, K_4)) = 5,483 \cdot 10^{13}$. Предположение оказалось верным, так как обусловленность оказалась недопустимо плохой.

В этих условиях необходимо перейти к другой системе уравнений, которая близка исходной, но не имеет столь существенного недостатка. Такой переход осуществляется с помощью инструментов регуляризации. Воспользуемся этой возможностью, привлекая метод Тихонова [10].

Синтез САУ с привлечением регуляризации по Тихонову

Примем величину параметра регуляризации λ , основываясь на имеющемся опыте и известных рекомендациях, равным 10^{-3} . Не приводя регуляризованное уравнение, которое в развернутой форме оказывается объемным, укажем главное: число обусловленности снизилось до величины $5,346 \cdot 10^9$, при которой вычислительные погрешности не будут играть решающей роли даже при стандартной разрядной сетке персональных компьютеров.

Для поиска результата, наиболее близкого к желаемому, привлечем инструментальную переменную ВИМ δ_1 и, изменяя ее, получим решение: $K_1 = 2,244$, $K_2 = 0,021$, $K_3 = 2,005$, $K_4 = 0,342$. Для сравнения полученного результата с желаемыми показателями найдем переходную характеристику. Она показана на рис. 4.

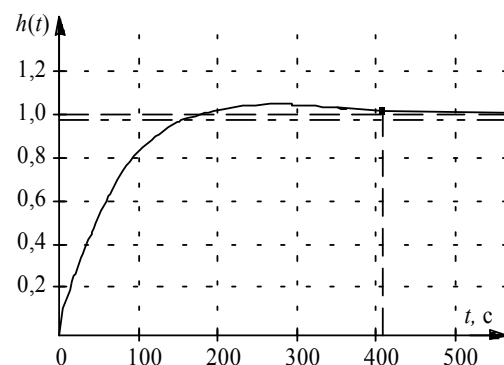


Рис. 4. График переходной характеристики САУ

Видно, что синтезированная система соответствует предъявляемым требованиям: время переходного процесса составляет 410,0 с, что значительно меньше заданного значения 1344 с; перерегулирование $\sigma \leq 4,7\%$, что также удовлетворяет условию $\sigma \leq 14,5\%$.

Заключение

В представленной работе можно выделить два аспекта. Первый относится к практической стороне задачи. Известно, что в общем случае системы с числом контуров более одного обладают лучшими динамическими показателями. Однако хорошо разработанные методы синтеза распространяются лишь на одноконтурные САУ, в то время как на практике обычно используются двух-, трехконтурные системы. В случае расчета таких систем возникают принципиальные трудности. В работе показана возможность расчета двухконтурной системы, не прибегая к традиционному способу последовательной настройки по контурам, для которого характерно появление дополнительной погрешности. Второй аспект работы, на который хотелось бы обратить внимание, относится к ее научной стороне. Уже отмечалось, что переход к расчету многоконтурных систем влечет за собой изменения в структуре уравнения синтеза САУ – оно переходит из класса линейных относительно коэффициентов корректирующих средств в класс нелинейных. Эти изменения приводят к принципиальным трудностям. Во-первых, это известные трудности решения нелинейных уравнений. Во-вторых, получаемые на этой основе системы уравнений не только нелинейные, но и плохо обусловленные. И в этих непростых условиях находится возможность получения решения численным методом, привлекая ВИМ.

В то же время нужно признать, что ограничения используемого пути синтеза многоконтурных систем существуют и очень существенны. Выделим два главных препятствия. Первое связано с использованием метода Ньютона, который требует знания хороших начальных приближений, что в общем случае проблематично. Отсюда вытекает задача разработки нового подхода к решению систем нелинейных уравнений, не имеющего столь жестких условий. Основания для поиска имеются. Они связаны со специфическими особенностями систем уравнений, которые могут улучшить алгоритм и снизить требования по точности начальных приближений. Второе препятствие определено числом искомых коэффициентов: их увеличение до пяти-шести часто делает задачу неразрешимой. Эти две задачи остаются открытыми для рассмотрения.

Литература

1. Belyaev A.S. Analysis of noisy signal restoration quality with exponential moving average filter [Electronic resources] / A.S. Belyaev, I.A. Tutov, D.V. Butuzov // Control and Communications (SIBCON): Proceedings of the XII International Siberian Conference, Moscow, May 12–14, 2016. – [S. I.]: IEEE, 2016. – М. – 4 р. – Title screen [Электронный

ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491750>, платный (дата обращения: 20.10.2017).

2. Бутузов Д.В. Математическая модель испытательной установки химического реактора с водяной рубашкой / Д.В. Бутузов; науч. рук. И.А. Тутов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. трудов XIV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 319–320.

3. Алфёров С.М. Моделирование задатчика давления для настройки манометров / С.М. Алфёров., А.М. Коринов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2(26). – С. 193–198.

4. Бутузов Д.В. Разработка испытательного стенда нагревательной установки с водяной рубашкой / Д.В. Бутузов; науч. рук. И.А. Тутов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 223–224.

5. Shchelkanova T.A. The need of regularization for the synthesis of multi loop control systems. Proceedings of IV Russian-Korean scientific and technical seminar // Journal of Physics: Conf. Series. – 2016. – Vol. 803, № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012179/pdf>, свободный (дата обращения: 15.10.2017).

6. Goncharov V.I. The synthesis of multi-loop control systems / V.I. Goncharov, T.A. Shchelkanova // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491750>, платный (дата обращения: 12.09.2017).

7. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

8. Байрамов К.Р. Подход к разработке обобщенной технологической модели решения некорректных задач определения движения космических аппаратов по измерениям текущих навигационных параметров // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 2. – С. 119–123.

9. Гончаров В.И. Интерполяционный синтез регуляторов систем автоматического управления на основе нулей полиномов Чебышева / В.И. Гончаров, Ф.Д. Нгуен // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 304–309.

10. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А.А. Воронова, И.А. Огурка. – М.: Наука, 1984. – 344 с.

Емельянова Татьяна Алексеевна

Аспирант каф. систем управления и мехатроники (СУМ)
Института кибернетики (ИК)
Национального исследовательского
Томского политехнического ун-та (НИТПУ)
Тел.: +7-952-885-23-28
Эл. почта: emelyanova_ta@tehtsk.ru

Гончаров Валерий Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. СУМ НИТПУ
Тел.: +7 (382-2) 70-18-37
Эл. почта: gvi@tpu.ru

Дементьев Юрий Николаевич

Канд. техн. наук, зав. каф.

электропривода и электрооборудования

Энергетического института НИТПУ

Тел.: +7 (382-2) 60-61-05

Эл. почта: dementiev@mail2000.ru

Тутов Иван Андреевич

Ассистент каф. СУМ

Тел.: +7(923) 413-3887

Эл. почта: ivantutov@tpu.ru

Emelyanova T.A., Goncharov V.I.,

Dement'ev Y.N., Tutov I.A.

Synthesis of a two-loop control system for a chemical reactor using a numerical method with regularization

The paper presents a mathematical model of a chemical reactor for creating heat-resistant plastic. The synthesis of the temperature controllers of the multi-loop automatic control system based on the real interpolation method was carried out. The results for the synthesis of regulators of a multi-loop system are presented.

Keywords: chemical reactor, heat-resistant plastic, temperature, contour automatic control system, real interpolation method.