

Использование методов настройки и автоподстройки систем автоматического управления температурой на основе программируемого логического контроллера фирмы B&R

05, май 2017

Безхмельнов В.Д.^{1,*}, Солнцев В.И.^{1,**}, Сухов Ж.С.^{1,***}

УДК: 62-533.65+62-551.44

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

* viktor.bezkhmelnov@yandex.ru

** visolntsev@yandex.ru

*** gdan.94@mail.ru

Введение

Приблизительно 90-95% регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм работы. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость.

Но типовые ПИД-регуляторы не всегда обеспечивают необходимые статические и динамические показатели качества регулирования. В частности, такая проблема возникает при создании систем автоматического управления электрическими печами сопротивления, применяемыми во многих технологических процессах [1].

Были рассмотрены методы синтеза ПИД-регулятора, а именно методы Зиглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика [2,3], а также методы автонастройки, предложенные компанией B&R, и сделаны выводы по эффективности использования этих методов при синтезе контура управления электрической печью сопротивления. Эти методы были испытаны на реальной системе, состоящей из программируемого логического контроллера (ПЛК) фирмы B&R и эмулятора электрической печи.

Также была решена задача по идентификации электрической печи для построения ее математической модели. Использовался метод частотной идентификации в режиме релейного регулирования.

1. Идентификация объекта регулирования

Для того, чтобы получить частотные характеристики электрической печи, необходимо подавать ступенчатые сигналы различной частоты на вход и, исходя из выходных результатов, строить ЛАЧХ печи (рис. 1) [4].

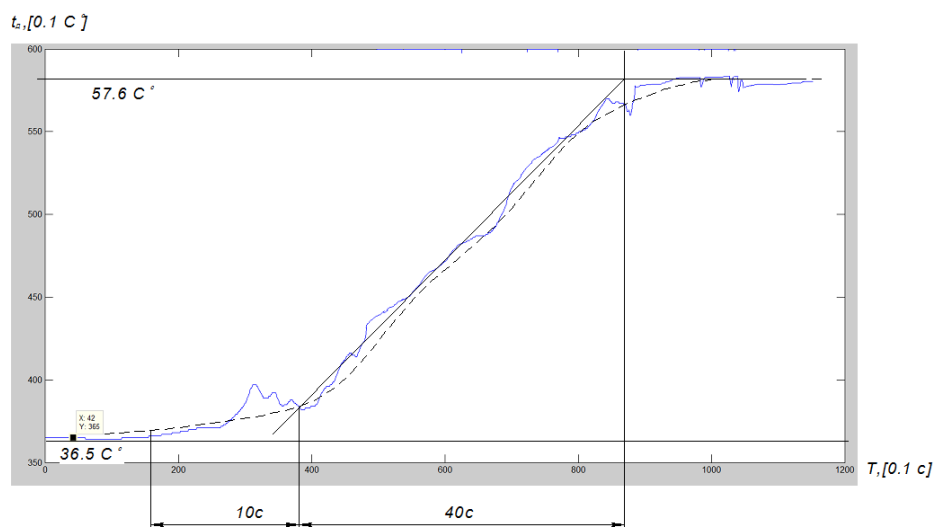


Рис. 1. Реакция объекта регулирования на ступенчатое воздействие

Многие промышленные управляемые системы обладают аperiodическим (неколебательным) поведением с инерционностью высокого порядка (в некоторых случаях с дополнительным запаздыванием). Передаточную функцию подобных систем можно аппроксимировать, используя инерционный элемент первого порядка с запаздыванием:

$$G(s) = \frac{k_s}{1+T_G s} \cdot e^{-sT_U}, \quad (1)$$

где k_s – коэффициент усиления элемента;

T_G – постоянная времени, характеризующая инерционность звена (с);

T_U – запаздывание системы во времени (с).

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента

№ эксперимента	T_G , с	T_U , с
1	48.9	10.0
2	51.0	11.1
3	48.0	10.0
4	52.1	8.9

В результате получаем средние значения $T_G = 50$ с, $T_U = 10$ с (рис. 2).

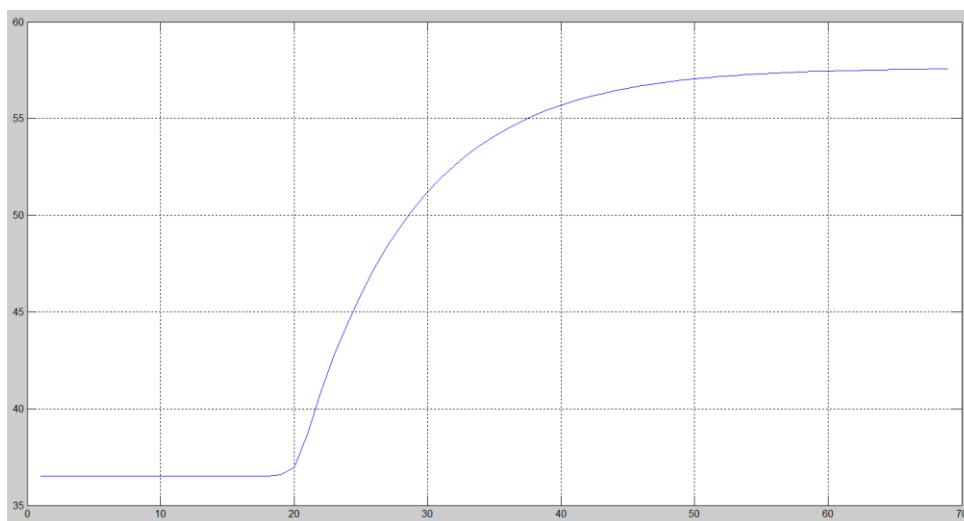


Рис. 2. Аппроксимация полученных результатов

На основании полученных данных была построена математическая модель объекта регулирования (рис. 3) и получен его ЛАЧХ (рис. 4).

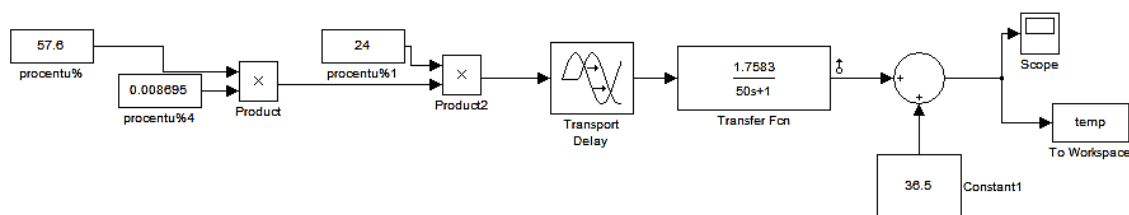


Рис. 3. Математическая модель объекта регулирования

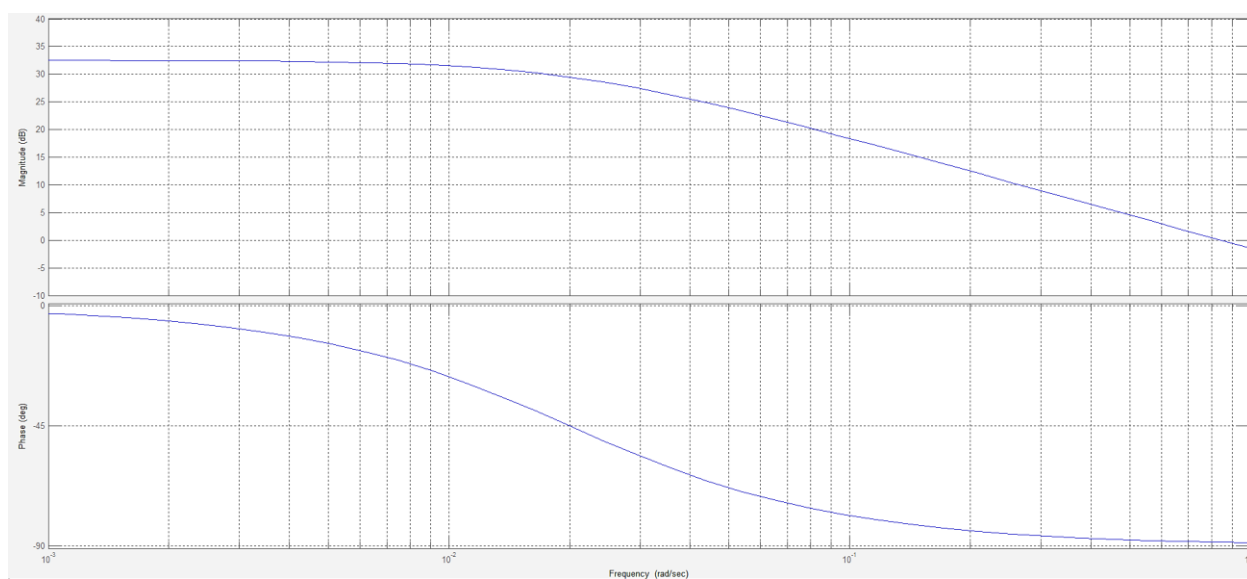


Рис. 4. ЛАЧХ объекта регулирования

2. Синтез ПИД-регулятора

Далее был синтезирован ПИД-регулятор (рис. 5) для регулирования температуры. Используются методики Зиглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика, а также методы автонастройки.

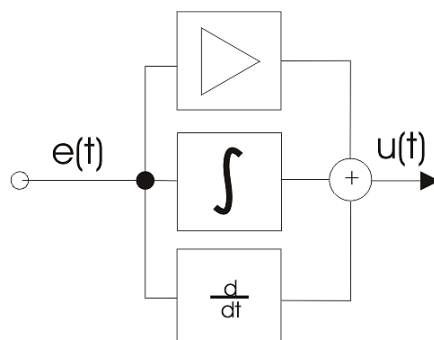


Рис. 5. Схема ПИД-регулятора

Существующие на сегодня методы синтеза ПИД-регуляторов можно разделить на следующие группы [5].

1) Интуитивная настройка

Способ настройки подразумевает изменение параметров ПИД-регулятора независимо друг от друга по «интуиции» до тех пор, пока цель управления не будет достигнута.

2) Характеристические методы.

Эти методы появились на основе практического опыта (так же как и методы Циглера-Никольса) и подразумевают настройку регулятора по данным полученным в результате испытания в разомкнутом контуре.

3) Аналитические методы (алгебраический синтез).

Параметры ПИД-регулятора вычисляются из аналитических или алгебраических зависимостей между моделью объекта и целью управления (например, метод внутренней модели (ИМС) и лямбда настройка). Как правило, аналитические методы дают простые формулы и могут быть использованы в адаптивных системах, однако требуется цель управления в аналитической форме и достаточно точная модель объекта управления.

4) Частотные методы.

Частотные характеристики объекта управления используются для настройки ПИД-регулятора. Как правило, эти методы ресурсоемкие и направлены на синтез робастных ПИД-регуляторов.

5) Оптимальный синтез.

Эти методы определяют, как особый вид оптимального управления, где коэффициенты ПИД-регулятора с помощью численных методов оптимизации, компьютерных эвристики или эволюционных алгоритмов. Как правило, оптимизация требует значительное количество ресурсов и осуществляется во временной области.

Данная классификация не является исчерпывающей и ограничивающей. Некоторые методы, используемые на практике, относятся к нескольким группам [5].

В настоящее время более распространена автонастройка ПИД-регуляторов. Это вызвано тем, что другие алгоритмы сложнее алгоритмов автонастройки и требуют большей вычислительной мощности. Кроме того, алгоритмы автонастройки прошли некий период апробации, так как идеи, заложенные в них основаны на простых методах настройки ПИД-регуляторов, подобные методам Циглера-Никольса.

Можно выделить два основных метода автонастройки.

1) Автонастройка по переходной характеристике ОУ.

В данном подходе параметры ПИД-регулятора выбираются на основе анализа переходной характеристики ОУ, полученной в результате ступенчатого воздействия. Недостатком этого подхода является то, что подаваемая ступенька должна быть достаточной величины для того, чтобы на фоне помех и внешних возмущений можно было выделить составляющую переходного процесса.

2) Автонастройка с помощью автоколебаний.

Данный подход подразумевает искусственное создание автоколебаний в контуре управления, что позволяет идентифицировать так называемую критическую точку (точку пересечения годографа АФЧХ замкнутой системы с отрицательной действительной осью $(-1;0j)$) путем измерения амплитуды и частоты автоколебаний, и использования формул пересчета для определения коэффициентов ПИД-регулятора [6].

3. Метод настройки параметров регулятора Зиглера-Никольса

Зиглер и Никольс предложили два метода настройки ПИД-регуляторов. Один из них основан на параметрах отклика объекта на единичный скачок, второй – на частотных характеристиках объекта управления. Для расчёта параметров ПИД регулятора по первому методу Зиглера Никольса используются всего два параметра: a и L (рис. 6).

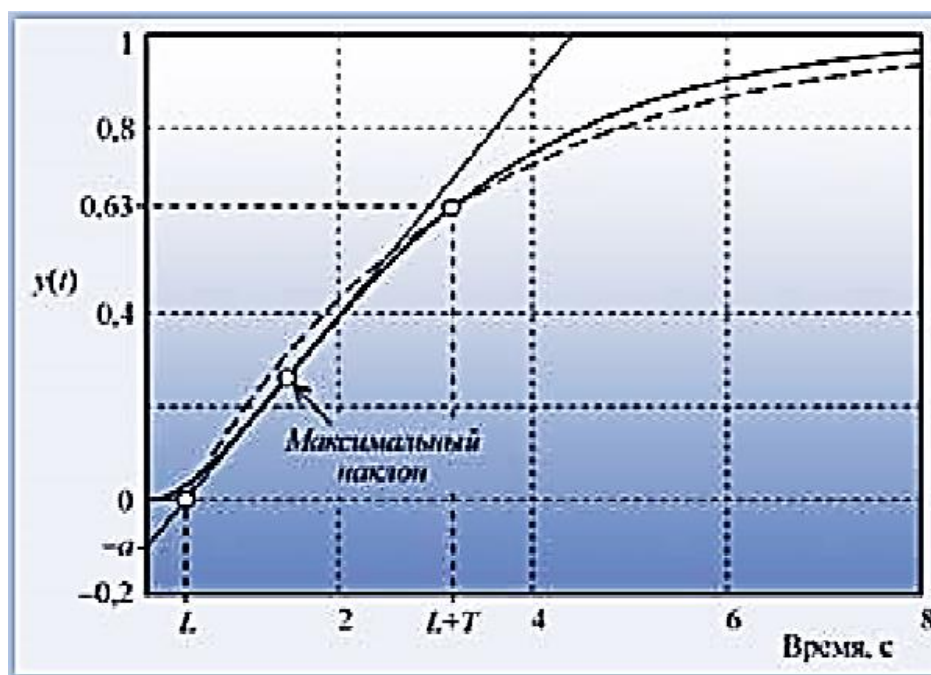


Рис. 6. Параметры для метода Зиглера-Никольса

Формулы для расчёта коэффициентов ПИД регулятора сведены в таблицу 2. Метод Зиглера Никольса даёт параметры, далёкие от оптимальных. Это объясняется не только упрощённостью самого метода (он использует только два параметра для описания объекта), но и тем, что параметры регулятора в этом методе определялись Зиглером и Никольсом, исходя из требования к декременту затухания, равному 4, что и даёт медленное затухание процесса колебаний. Метод Зиглера Никольса никак не учитывает требования к запасу устойчивости системы, что является вторым его недостатком. Судя по медленному затуханию переходного процесса в системе, этот метод даёт слишком малый запас устойчивости.

Таблица 2. Формулы для расчёта коэффициентов регулятора по методу Зиглера-Никольса

Регулятор	Расчет по отклику на скачок			Расчет по частотным параметрам		
	K	T_i	T_d	K	T_i	T_d
П	$1/a$	-	-	$0.5/K_{180}$	-	-
ПИ	$0.9/a$	$3L/K$	-	$0.4/K_{180}$	$0.8T_{180}/K$	-
ПИД	$1.2/a$	$0.9L/K$	$0.5L/K$	$0.6/K_{180}$	$0.5T_{180}/K$	$0.125T_{180}/K$

Второй метод Зиглера Никольса (частотный метод) в качестве исходных данных для расчёта использует частоту ω_{180} , на которой сдвиг фаз в разомкнутом контуре достигает 180° , и модуль коэффициента петлевого усиления на этой частоте K_{180} . Зная параметр ω_{180} , сначала находят период собственных колебаний системы, а затем по табл. 1 определяют параметры регулятора. Точность настройки регулятора и недостатки обоих методов Зиглера Никольса одинаковы.

Алгоритм синтеза ПИД-регулятора с помощью метода Зиглера-Николса.

1) Выставляем все коэффициенты (K_p , K_i , K_d) равными нулю.

2) Начинаем постепенно увеличивать значение K_p и следим за реакцией системы. Нам нужно добиться, чтобы в системе начались устойчивые колебания (вызванные перерегулированием). Увеличиваем K_p , пока колебания системы не стабилизируются (перестанут затухать).

3) Запоминаем текущее значение K_p (обозначим его K_u) и замеряем период колебаний системы (T_u).

Теперь используем полученные значения K_u и T_u для расчета всех параметров ПИД регулятора по формулам

$$K_p = 0.6 \cdot K_u, \quad (2)$$

$$K_i = \frac{2 \cdot K_p}{T_u}, \quad (3)$$

$$K_d = \frac{K_p \cdot T_u}{8}. \quad (4)$$

Для дискретных регуляторов нужно еще учесть период дискретизации T (умножить K_i на T , разделить K_d на T) [2].

4. Метод настройки параметров регулятора Чина-Хронеса-Ресвика

В отличие от Зиглера и Никольса, которые использовали в качестве критерия качества настройки декремент затухания, равный 4, Чин, Хронес и Ресвик использовали критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии не более чем 20 процентного перерегулирования. Такой критерий позволяет получить больший запас устойчивости, чем в методе Зиглера Никольса. Метод ЧХР даёт две разные системы параметров регулятора. Одна из них получена при наблюдении отклика на изменение уставки (таблица 3), вторая – при наблюдении отклика на внешние возмущения (таблица 4).

Таблица 3. Формулы для расчёта коэффициентов регулятора по методу Чина-Хронеса-Ресвика, по отклику на изменение уставки

Регулятор	Без перерегулирования			С 20-процентным перерегулированием		
	K	T_i	T_d	K	T_i	T_d
П	$0.3 / a$	-	-	$0.7 / a$	-	-
ПИ	$0.35 / a$	$1.2L / K$	-	$0.6 / a$	$1.0L / K$	-
ПИД	$0.6 / a$	$1.0L / K$	$0.5L / K$	$0.95 / a$	$1.4L / K$	$0.47L / K$

Таблица 4. Формулы для расчёта коэффициентов регулятора по методу Чина-Хронеса-Ресвика, по отклику на внешние возмущения

Регулятор	Без перерегулирования			С 20-процентным перерегулированием		
	K	T_i	T_d	K	T_i	T_d
П	$0.3 / a$	-	-	$0.7 / a$	-	-
ПИ	$0.6 / a$	$4L / K$	-	$0.7 / a$	$2.3L / K$	-
ПИД	$0.95 / a$	$2.4L / K$	$0.42L / K$	$1.2 / a$	$2.0L / K$	$0.42L / K$

Какую систему параметров выбирать, зависит от того, что важнее для конкретного регулятора: качество регулирования при изменении уставки или ослабление внешних воздействий. Если же важно и то, и другое, то необходимо использовать регуляторы с двумя степенями свободы. Метод CHR использует аппроксимацию объекта моделью первого порядка с задержкой. В CHR используются те же исходные параметры a и L , что и в методе Зиглера Никольса (рис. 6). Обратим внимание, что пропорциональный коэффициент в методе CHR меньше, чем в методе Зиглера Никольса [3].

5. Методы автоподстройки параметров регулятора

Все виды автоматической настройки используют три принципиально важных этапа: идентификация, расчёт параметров регулятора, настройка регулятора. Часто конечный этап включает этап подстройки (заключительная оптимизация настройки). Оптимизация настройки необходима в связи с тем, что методы расчёта параметров регулятора по формулам не учитывают нелинейности объекта, в частности, всегда присутствующую нелинейность типа «ограничение», а идентификация параметров объекта выполняется с неко-

торой погрешностью. Структурная схема самонастраивающейся системы приведена на рис. 7.

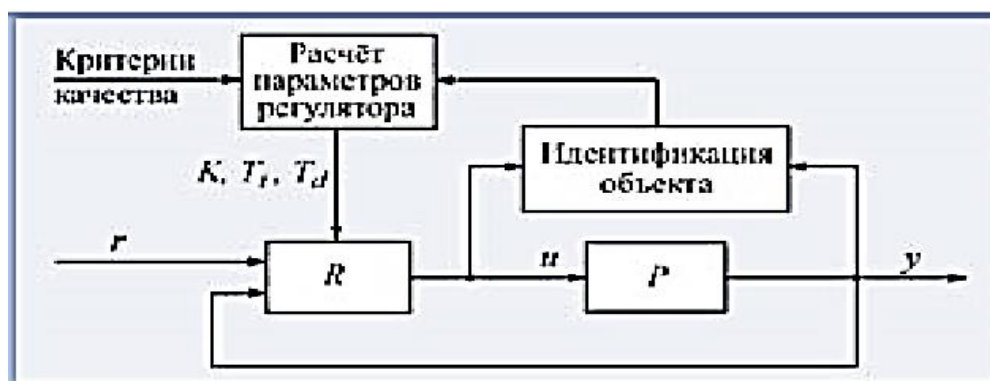


Рис. 7. Структурная схема самонастраивающейся системы

Автонастройка практически не имеет никаких особенностей по сравнению с описанными ранее методами, за исключением того, что она выполняется в автоматическом режиме. Основным этапом автоматической настройки и адаптации является идентификация модели объекта. Она выполняется в автоматическом режиме обычными методами идентификации параметров моделей. Автоматическая настройка может выполняться и без идентификации объекта, основываясь на правилах или поисковых методах [6].

6. Результаты экспериментов

Изученные методы были опробованы на реальной системе, состоящей из ПЛК, который осуществлял функции управления и эмулятора электрической печи.

На рис. 8-11 переходные процессы системы при различных методах регулирования. В таблицах указаны параметры, полученные различными методами (таблица 5).

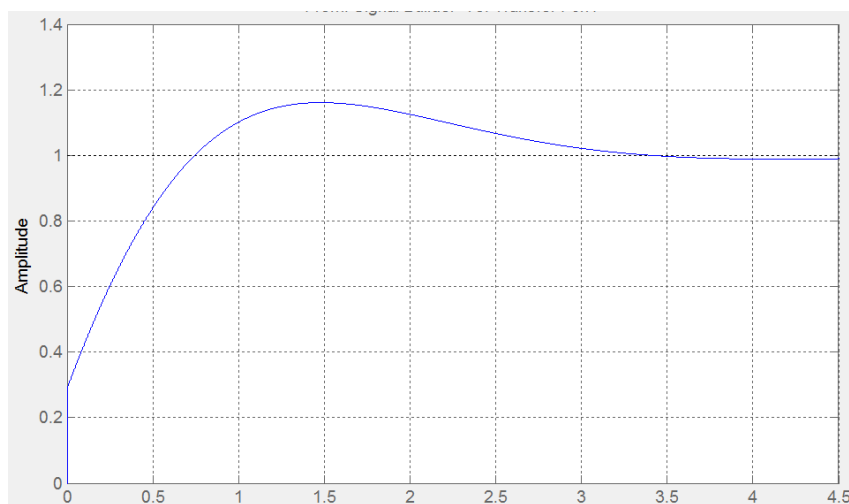


Рис. 8. Переходный процесс, метод Зиглера-Никольса

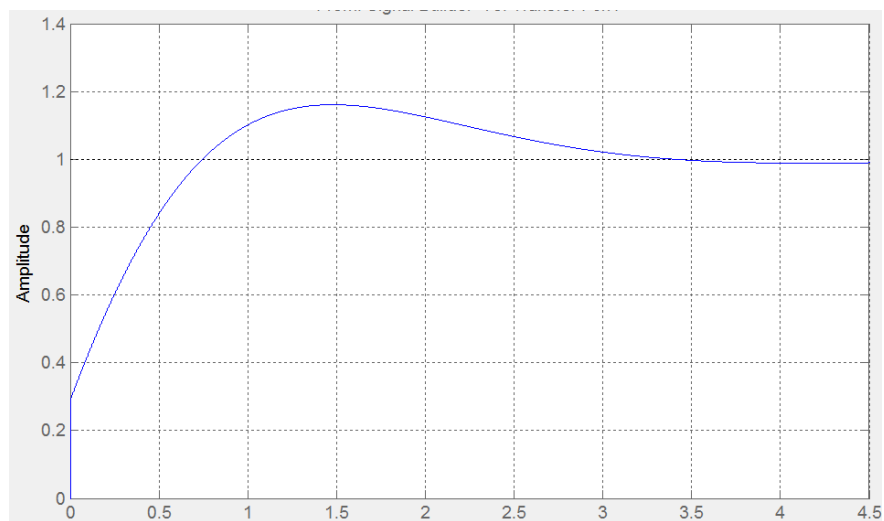


Рис. 9. Переходный процесс, метод Чина-Хронеса-Ресвика

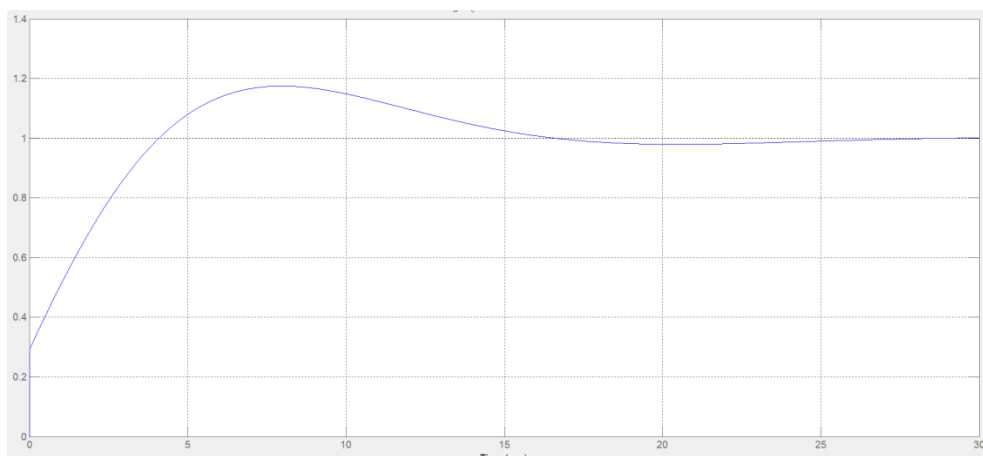


Рис. 10. Переходный процесс, автонастройка колебаниями

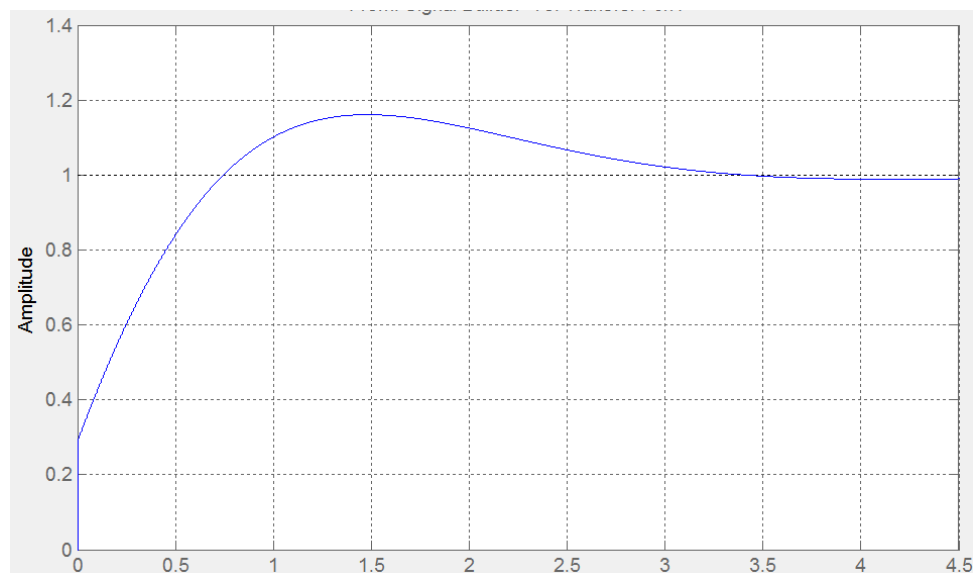


Рис. 11. Переходный процесс, автонастройка по ступенчатому воздействию

Таблица 5. Параметры, полученные различными методами синтеза

Метод	k_p	T_N, c	T_V, c
Зиглера-Никольса	12	0.6	0.7
Чина-Хронеса-Ресвика	11	0.3	13
Автонастройка. Частотный метод	13.16	354	0.88778
Автонастройка. Реакция на ступенчатое воздействие	79.1	0.83	0.146

Заключение

Для получения параметров объекта управления был использован метод частотной идентификации в режиме релейного регулирования. Была получена ЛАЧХ объекта, а также построена его модель.

Были изучены методы синтеза ПИД-регулятора и использованы на реальном объекте управления. В результате проведенных экспериментов можно сказать, что наиболее целесообразно использование методов автоподстройки, так как они позволяют получить более точные характеристики системы. Также эти методы являются менее трудоемкими, поскольку при их использовании задача идентификации решается автоматически.

Список литературы

- [1]. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art. // IEEE Control Systems Magazine. 2006. Vol. 26. Is. 1. P. 42 - 54.
- [2]. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.
- [3]. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. P. 175-185.
- [4]. Cai W.-J., Fang Y., Wang Y.-G. Robust closed-loop process identification from step test. // Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 6-9 Dec. 2004. ICARCV. 2004. Vol. 2. P. 907 - 912.
- [5]. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1. // СТА. 2007. №4. С.86-97.
- [6]. Aidan O'Dwyer. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd. London: Imperial College Press. 2009. 623 p.