

РЕАЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА SIEMENS¹

Александров А. Г.², Резков И. Г.³, *(Учреждение
Российской академии наук Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Описывается алгоритм адаптивного ПИД-регулятора фирмы Siemens. Приводятся особенности реализации адаптивного ПИД-регулятора с конечно-частотной идентификацией для промышленного контроллера Siemens S7-313C. Приводятся результаты экспериментальных испытаний при наличии внешнего возмущения.

Ключевые слова: адаптивный регулятор, ПИД-регулятор, конечно-частотная идентификация, промышленный контроллер.

Введение

Программируемые промышленные контроллеры широко применяются при управлении технологическими процессами. В мире достаточно широко распространены контроллеры Siemens серии S7. Для автонастройки ПИД-регулятора фирма Siemens предоставляет программное обеспечение Siemens PID Self-tuner [4].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №12-08-00021-а

² Александров Альберт Георгиевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПУ РАН, (alex7@ipu.ru),

³ Резков Илья Геннадьевич, младший научный сотрудник ИПУ РАН, (irezkov@adaplab.ru).

1. Алгоритм *Siemens PID Self-tuner*

Алгоритм автонастройки по этапам приведен на рисунке 1.

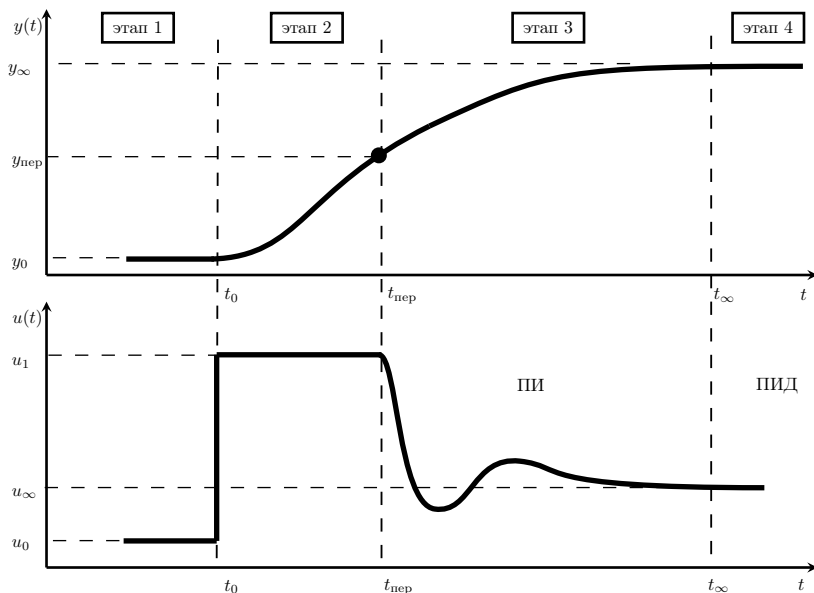


Рис. 1. Этапы настройки ПИД-регулятора по алгоритму *PID Self-Tuner*

Настройка ПИД-регулятора состоит из четырёх этапов. На первом этапе управление объектом производится в ручном режиме (часто, например для тепловых процессов, объект находится в "холодном" состоянии).

На этапе 2 настройки, в течение которого обратная связь остаётся разомкнутой, на вход объекта поступает фиксированное значение управления. Программа автонастройки постоянно наблюдает значение выхода объекта $y(t)$ и ищет точку перегиба ($y_{\text{пер}}$, $t_{\text{пер}}$, $\dot{y}_{\text{пер}}$), то есть момент, когда переходная характеристика достигает максимальной крутизны.

По окончании второго этапа оценивается значение за-

держки T_U . Зная точку перегиба, модель процесса аппроксимируется выражением

$$W_{p1}(s) = \frac{K_{\text{и}}}{s(T_2 s + 1)}, \quad K_{\text{и}} = \frac{\dot{y}_{\text{пер}}}{\Delta y}, \quad T_2 = T_U = t_{\text{пер}} - t_0 - t_{\text{рост}},$$

$$t_{\text{рост}} = \frac{\Delta y}{\dot{y}_{\text{пер}}}, \quad \Delta y = y_{\text{пер}} - y_0,$$

имея которую синтезируется ПИ-регулятор на базе метода симметричного оптимума [3, стр. 263], в соответствии с которым коэффициенты регулятора находятся как

$$T_i = 4T_2, \quad K_p = \frac{T_i}{8T_2^2 K_{\text{и}}}.$$

Во избежание перерегулирования используются «ослабленные» настройки регулятора:

$$T_i = 10T_2, \quad K_p = \frac{T_i}{32T_2^2 K_{\text{и}}}.$$

При переходе на этап 3 объект замыкается с помощью отрицательной обратной связи. Переход на этап 4 означает, что выход объекта y пришел к уставке y_{sp} , что даёт возможность определить статический коэффициент усиления объекта

$$K = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0},$$

и следовательно, можно уточнить модель объекта:

$$(1) \quad W_p(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad T_1 > T_2.$$

Модель (1) действительна при следующем соотношении постоянных времени:

$$2 < \frac{T_1}{T_2} < 20,$$

или

$$\frac{T_A}{T_U} > 9.64,$$

где промежуток времени T_A определяется через точки пересечения касательной в точке перегиба с параллельными $y(t) = y_0$ и $y(t) = y_\infty$. В противном случае принимается модель объекта n -го порядка

$$W_p = \frac{K}{(T_1 s + 1)^n}, \quad n > 2.$$

В литературе имеются таблицы для определения времени задержки T_U и времени восстановления T_A для такого типа моделей [2].

2. Расчетные формулы частотного адаптивного управления

В данном разделе приводятся основные выкладки, использованные при разработке адаптивного регулятора ЧАР-ПИД-2S для контроллера Siemens S7-313C.

Идентификация объекта 2 порядка производится методом конечно-частотной идентификации [1]. Объект имеет вид:

$$W_p(s) = \frac{k_1 s + k_0}{d_2 s^2 + d_1 s + 1}$$

Частотные уравнения примут вид:

$$\begin{cases} k_1 j \omega_1 + k_0 - (\alpha_1 + j \beta_1)(-d_2 \omega_1^2 + d_1 j \omega_1) = \alpha_1 + j \beta_1, \\ k_1 j \omega_2 + k_0 - (\alpha_2 + j \beta_2)(-d_2 \omega_2^2 + d_1 j \omega_2) = \alpha_2 + j \beta_2, \end{cases}$$

где ω_1, ω_2 — частоты испытательного сигнала $v(t) = \rho_1 \sin(\omega_1 t) + \rho_2 \sin(\omega_2 t)$, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ — частотные параметры, получаемые экспериментально.

Решая последовательно данные уравнения, получим следующие выражения для нахождения коэффициентов объекта:

$$(2) \quad d_1 = \frac{\alpha_1 \beta_2 \omega_1^3 - \alpha_2 \beta_1 \omega_1^2 \omega_2 - \alpha_1 \beta_2 \omega_1 \omega_2^2 + \alpha_2 \beta_1 \omega_2^3}{d_1^{\text{знам}}},$$

где $d_1^{\text{знам}} = \omega_1 \omega_2 (\alpha_1^2 \omega_1^2 - \alpha_1 \alpha_2 \omega_1^2 - \alpha_1 \alpha_2 \omega_2^2 + \alpha_2^2 \omega_2^2 + \beta_1^2 \omega_1^2 - 2 \beta_1 \beta_2 \omega_1 \omega_2 + \beta_2^2 \omega_2^2)$,

$$(3) \quad d_2 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2 - \beta_1 d_1 \omega_1 + \beta_2 d_1 \omega_2)}{(\alpha_1 \omega_1^2 - \alpha_2 \omega_2^2)}$$

$$(4) \quad k_1 = \frac{(-\beta_1 d_2 \omega_1^2 + \alpha_1 d_1 \omega_1 + \beta_1)}{\omega_1}$$

$$(5) \quad k_0 = -\alpha_1 d_2 \omega_1^2 - \beta_1 d_1 \omega_1 + \alpha_1.$$

Для нахождения коэффициентов **ПИД-регулятора** используется метод внутренней модели [5], в соответствии с которым расчётные формулы выводятся следующим образом. Объект имеет вид:

$$(6) \quad W_p(s) = \frac{K(Ts + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{K(Ts + 1)}{d_2s^2 + d_1s + 1}.$$

Замкнутая система выбирается в виде:

$$(7) \quad W_{\text{жел}}(s) = \frac{Ts + 1}{(\lambda s + 1)^2},$$

где λ — свободный параметр, определяющий быстродействие замкнутой системы. В соответствии с методом внутренней модели ПИД-регулятор определяется из следующего выражения:

$$(8) \quad W_c(s) = \frac{W_{\text{жел}}(s)}{W_p(s)(1 - W_{\text{жел}}(s))} = \frac{1}{T_f s + 1} K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

где $T_f = \frac{\lambda^2}{2\lambda - T}$ — постоянная времени фильтра регулятора,

$K_p = \frac{d_1}{K(2\lambda - T)}$ — пропорциональный коэффициент, $T_i = d_1$ — время интегрирования, $T_d = d_2/d_1$ — время дифференцирования.

ПИД-регулятор в дискретном виде. Для получения формул по приведению непрерывного ПИД-регулятора (8) к дискретному виду, коэффициенты которого можно непосредственно рассчитать в контроллере в режиме реального времени, применим стандартный подход разложения передаточной функции

$$(9) \quad W_c(s) = \frac{1}{T_f s + 1} K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

на простые дроби и применения к ним дискретного Z-преобразования. Такой подход позволяет реализовать как

быстрый расчёт дискретного ПИД-регулятора без использования ресурсоёмких операций вычисления обратных матриц, так и работу самого ПИД-регулятора в режиме реального времени. Регулятор (9) раскладывается на простейшие дроби в соответствии с выражением

$$W_c(s) = \frac{K_p}{1+gs} + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{-K_p g}{T_i(1+gs)} + \frac{K_p T_d s}{1+gs}$$

Проведя дискретизацию дробей, получаем дискретный регулятор (h — период дискретности)

$$(10) \quad W_c(z) = \frac{k_1 z^2 + k_2 z + k_3}{d_1 z^2 + d_2 z + d_3},$$

где

$$k_1 = \frac{K_p T_d}{g},$$

$$k_2 = -K_p e^{-h/g} + K_p + \frac{K_p h}{T_i} + \frac{K_p}{T_i} g e^{-h/g} - \frac{K_p}{T_i} g - \frac{2K_p T_d}{g},$$

$$k_3 = K_p e^{-h/g} - K_p - \frac{K_p h}{T_i} e^{-h/g} - \frac{K_p}{T_i} g e^{-h/g} + \frac{K_p}{T_i} g + \frac{K_p T_d}{g},$$

$$d_1 = 1, \quad d_2 = -1 - e^{-h/g}, \quad d_3 = e^{-h/g}.$$

Алгоритм конечно-частотного адаптивного управления состоит из следующих операций: 1) подать испытательный сигнал; 2) идентифицировать объект по формулам (2)–(5); 3) рассчитать коэффициенты регулятора (10); 4) замкнуть объект найденным регулятором.

3. Программное обеспечение и экспериментальные исследования

В состав контроллера S7-313C входят ЦАП и АЦП, имеющие 12-битные квантователи. Контроллер предоставляет в распоряжение программно-аппаратные прерывания с конфигурируемой частотой. Основная часть программы регулятора — подпрограмма прерывания, в которой выполняются все основные вычислительные действия.

Поскольку вычислительные формулы простые, нет необходимости разбивать программу на параллельные потоки.

3.1. Эксперимент без внешнего возмущения

Модель объекта управления взята из статьи [4] и реализована для промышленного компьютера Athena, имитирующем объект:

$$6000\ddot{y}(t) + 230\dot{y}(t) + y(t) = 3u(t) + f(t),$$

эксперименты проводятся в отсутствие внешнего возмущения ($f(t) = 0$). На рисунке 2 приведён график, снятый с использованием регулятора Siemens PID Self-tuner, а на рисунке 3 — с регулятором ЧАР-ПИД-2S.

Поскольку внешнее возмущение на объект не действует, самонастройка в обоих случаях происходит в штатном режиме.

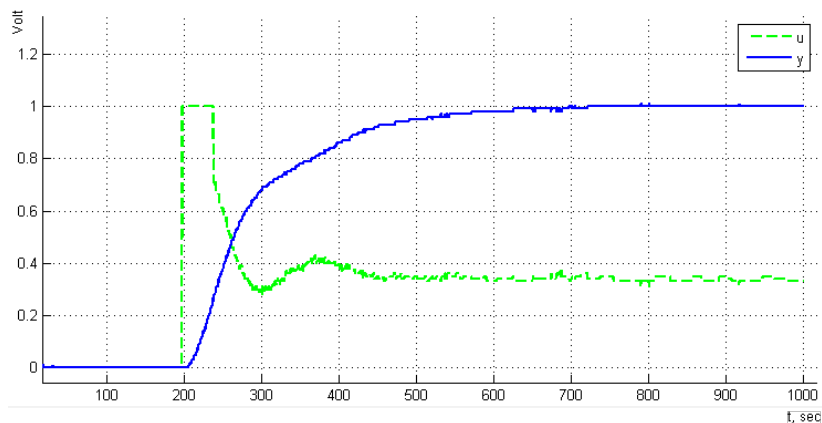


Рис. 2. Эксперимент №1 с регулятором Siemens PID Self-tuner

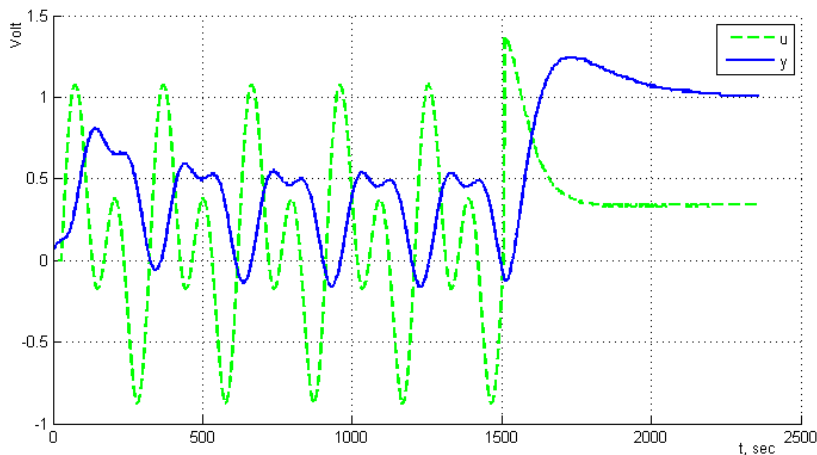


Рис. 3. Эксперимент №1 с регулятором ЧАР-ПИД-2S

3.2. Эксперимент с внешним возмущением

В модели объекта присутствует внешнее возмущение:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_1, \\ -2, & \text{при } t_1 < t < t_1 + 90, \\ 0, & \text{при } t \geq t_1 + 90, \end{cases}$$

где t_1 – некоторый промежуток времени после начала настройки. Соответствующие графики процесса приведены на рисунках 4 и 5.

В случае с регулятором Siemens PID Self-tuner система после настройки становится неустойчивой (из-за наличия ограничения на физические сигналы появляются автоколебания), а регулятор ЧАР-ПИД-2S при тех же условиях адекватно находит модель объекта и после настройки приводит выход объекта к уставке.

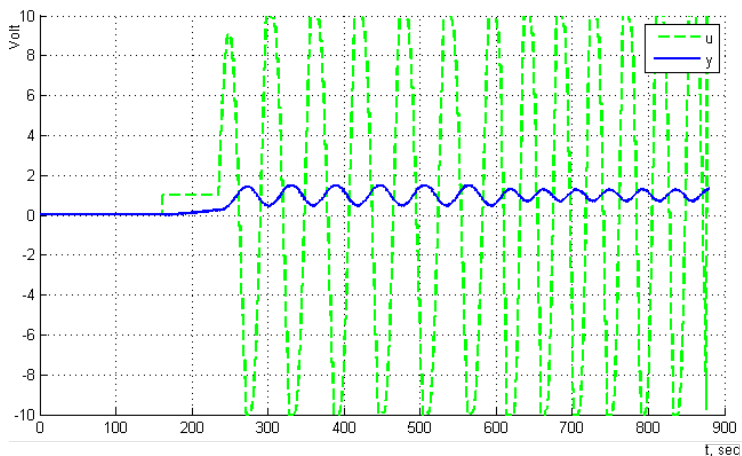


Рис. 4. Эксперимент №2 с регулятором Siemens PID Self-tuner

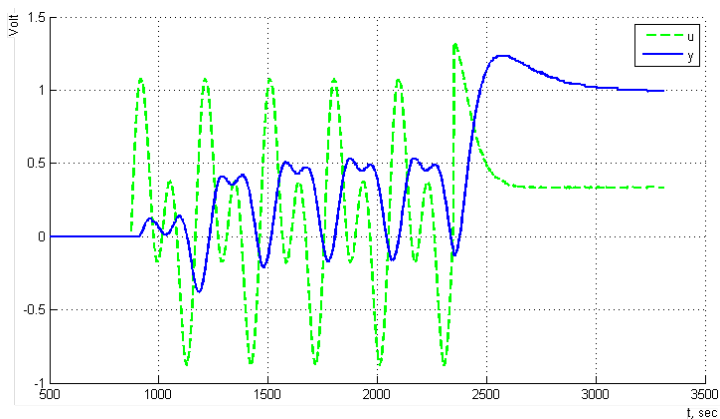


Рис. 5. Эксперимент №2 с регулятором ЧАР-ПИД-2S

Заключение

Применение адаптивного ПИД-регулятора ЧАР-ПИД-2S позволяет значительно расширить область применимости ПИД-регулятора с функцией адаптации на объекты с внешним возмущением.

Литература

1. Александров А. Г. Частотное адаптивное управление устойчивым объектом при неизвестном ограниченном возмущении // АИТ. — 2000. — № 4. — С. 106–116.
2. Frohr F., Orttenburger F. Introduction to electronic control engineering. — Siemens, 1982.
3. Isermann R., Lachmann K.H., Matko D. Adaptive Control Systems. Prentice-Hall international series in systems and control engineering. — Prentice Hall, 1992.
4. Pfeiffer Bernd-Markus. Towards ‘plug and control’: self-tuning temperature controller for PLC // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2000. — Vol. 14, no. 5. — P. 519–532.
5. Visioli A. Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID Controllers // 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain. — IFAC, 2002.

IMPLEMENTATION OF FREQUENCY ADAPTIVE CONTROL FOR THE CONTROLLER SIEMENS

Albert Alexandrov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, master research fellow (alex7@ipu.ru),

Ilja Rezkov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, junior research fellow (irezkov@adaplab.ru).

Abstract: The algorithm of Siemens adaptive PID-regulator is given. The features of the implementation of adaptive PID-controller with finite-frequency identification for industrial controller Siemens S7-313C are given. The results of experimental investigations in the presence of the exogenous disturbances are presented.

Keywords: adaptive regulator, adaptive controller, PID, finite-frequency identification, industrial controller.