

# САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ПИД-РЕГУЛЯТОР (СН-ПИД-1)

**Александров А. Г., Паленов М. В.**

*Институт Проблем Управления им. Трапезникова В.А. РАН, 65 Профсоюзная, Москва, 117997, Россия  
alex7@ipu.rssi.ru, max\_elek@mail.ru*

Ключевые слова: ПИД-регулятор, частотная идентификация, неизвестное внешнее возмущение, самонастройка.

Аннотация: Предлагается самонастраивающийся ПИД-регулятор для объектов с запаздыванием, способный функционировать при значительных изменениях параметров объекта при переходе с режима на режим в условиях действия неизвестных внешних возмущений. Для идентификации используется конечно-частотный метод, испытательный сигнал которого настраивается в зависимости от интенсивности внешнего возмущения.

## Введение

В промышленности для управления объектами широко применяются ПИ- и ПИД-регуляторы, зарекомендовавшие себя своей эффективностью и простотой реализации. Часто параметры объекта неизвестны, тогда в таком случае применяют алгоритмы адаптивного управления [1, 2, 3, 4].

В ряде случаев неизвестные параметры объекта изменяются (дрейфуют) во времени. Это изменение вызвано изменением нагрузки на технологический агрегат, изменением качества сырья, используемого в технологическом процессе и т.д. Дрейфующие коэффициенты объекта аппроксимируются кусочно-постоянными функциями времени, а интервал, в течение которого коэффициенты постоянны будет называться длительностью режима работы объекта.

Многорежимность объекта и высокий уровень внешних возмущений затрудняют использование адаптации в алгоритмах [1, 2]. Алгоритм адаптации для многорежимного объекта предложенный в [5] работает с предположением, что сохраняется смежная устойчивость (регулятор предыдущего режима обеспечивает устойчивость на текущем режиме работы объекта) для всех режимов, а так же известны коэффициенты первого режима работы объекта. В предлагаемом самонастраивающемся ПИД-регуляторе такие предположения сняты, благодаря применению, при невыполнении требования смежной устойчивости, И-регулятора и специальному выбору частот испытательного сигнала.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим систему управления, описываемую уравнениями

$$(1) \quad T^{[i]} \dot{y}(t) + y(t) = K^{[i]} u(t - t^{[i]}) + f(t), \quad t^{[i-1]} \leq t < t^{[i]}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

$$(2) \quad g^{[i]} \dot{u} + u = k_c^{[i]} \int_{t_0}^t e(t) dt + \frac{1}{T_i^{[i]}} \int_{t_0}^t e(t) dt + T_d^{[i]} \frac{de(t)}{dt}$$

$$(3) \quad e(t) = y_{sp}(t) - y(t) + n(t)$$

где  $y(t)$  измеряемый выход объекта (1),  $u(t)$  управление, формируемое ПИД-регулятором (2) и подаваемое на объект (1),  $y_{sp}(t)$  измеряемое задающее воздействие,  $f(t)$  неизмеряемое внешнее возмущение, являющееся неизвестной ограниченной функцией ( $|f(t)| \leq f^*$ ),  $v(t)$  испытательный (идентифицирующий) сигнал, который является известной функцией времени,  $e(t)$  ошибка слежения,  $i$  номер режима работы объекта ( $i = 1, \dots, N$ ).

Коэффициенты объекта (1) ( $K^{[i]}$ ,  $T^{[i]}$ ,  $t^{[i]}$ ) – неизвестные числа, изменяются в известные, для простоты, моменты времени  $t^{[1]}$ ,  $t^{[2]}$ , ...,  $t^{[N]}$ , и постоянны внутри интервалов времени

$$(4) \quad t^{[i-1]} \leq t < t^{[i]}, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Длина интервалов (4) такова, что  $t^{[i+1]} - t^{[i]} > t_{сам}^{[i]}$  ( $i = \overline{1, N}$ ), где  $t_{сам}^{[i]}$  время самонастройки в  $i$ -ом режиме ( $i = \overline{1, N}$ ).

Известны границы возможных значений коэффициентов объекта

$$(5) \quad \underline{K} \leq K^{[i]} \leq \overline{K}, \underline{T} \leq T^{[i]} \leq \overline{T}, \underline{t} \leq t^{[i]} \leq \overline{t},$$

где нижние ( $\underline{K}$ ,  $\underline{T}$ ,  $\underline{t}$ ) и верхние ( $\overline{K}$ ,  $\overline{T}$ ,  $\overline{t}$ ) границы интервалов известные положительные числа. Интервалы возможных значений параметров объекта таковы, что не существует ПИД-регулятора с неизменяемыми коэффициентами, который бы обеспечивал устойчивость для всех режимов работы объекта.

Задача состоит в том, чтобы адаптировать ПИД-регулятор к изменяющемуся объекту так, чтобы переходный процесс, при отсутствии внешнего возмущения, был близок к апериодическому со временем регулирования  $T/\chi + \tau$  ( $\chi = 1..4$ ), а ошибка слежения, при воздействии внешнего возмущения, на каждом интервале после времени  $t_{сам}^{[i]}$  была ограниченной

$$(6) \quad e^{[i]}(t) = e^{[i]*}(t) + x(t), \quad t^{[i]} \leq t < t_{сам}^{[i]}$$

где  $e^{[i]*}(t)$  достижимая ошибка слежения при известном объекте на  $i$ -ом режиме,  $x(t)$  достаточно малая по модулю функция.

Предполагается, что достижимая ошибка слежения  $e^{[i]*}(t)$  удовлетворяет неравенству

$$(7) \quad |e^{[i]*}(t)| \leq e^*$$

где  $e^*$  заданное число.

Влияние испытательного сигнала  $v(t)$  на выход объекта описывается коэффициентом влияния испытательного сигнала

$$(8) \quad K_v = \sqrt{\frac{\int_{t+a}^{t+2a} (y_{sp}(t) - y_v(t))^2 dt}{\int_t^{t+a} (y_{sp}(t) - y(t))^2 dt}}$$

где  $y_v(t)$  выход системы при подаче на её вход испытательного сигнала,  $a$  достаточно большое число.

## 2. Построение регулятора при известных коэффициентах объекта

Синтез ПИД-регулятора (2) осуществляется с помощью метода внутренней модели управления [6], являющегося модификацией  $\lambda$ -настройки, предложенный в [7].

Если параметры объекта известны, то коэффициенты регулятора находятся следующим образом

$$(9) \quad k_c = \frac{2T + t}{2K(l + t)}, \quad T_i = \frac{2T + t}{2}, \quad T_d = \frac{Tt}{2T + t}, \quad g = \frac{lt}{2(l + t)}$$

где  $\lambda$  заданное положительное число.

При таком регуляторе уравнение системы (1)-(2) с высокой степенью точности описывается (при  $v(t) = 0$  и  $f(t) = 0$ ) уравнением

$$(10) \quad l \dot{y} + y = y_{sp}(t - t)$$

### 3. Идентификация объекта

Для построения регулятора (2) необходимо идентифицировать коэффициенты объекта в каждом режиме его работы.

Идентификация объекта (1) затруднена несколькими обстоятельствами: а) задающее воздействие  $y_{sp}(t)$  часто является постоянной функцией и поэтому входной сигнал  $u(t)$  - недостаточно «богат» гармониками [8]; б) внешнее возмущение  $f(t)$  - неизвестная ограниченная функция; в) идентификация объекта должна осуществляться при работе объекта в системе (1)-(2).

Для идентификации объекта будем использовать известный испытательный сигнал следующего вида

$$(11) \quad v = r_1 \sin w_1 t + r_2 \sin w_2 t$$

где  $r_k$  и  $w_k$   $k = (1, 2)$  известные положительные числа, их определение приведено ниже.

Для фильтрации сигналов  $u(t)$  и  $y(t)$  будем использовать фильтр Фурье следующего вида

$$(12) \quad \hat{a}_{yk} = a_{yk}(y) = \frac{2}{r_k y} \int_{t_F}^{t_F + y} y(t) \sin w_k t dt, \quad \hat{b}_{yk} = b_{yk}(y) = \frac{2}{r_k y} \int_{t_F}^{t_F + y} y(t) \cos w_k t dt, \\ \hat{a}_{uk} = a_{uk}(y) = \frac{2}{r_k y} \int_{t_F}^{t_F + y} u(t) \sin w_k t dt, \quad \hat{b}_{uk} = b_{uk}(y) = \frac{2}{r_k y} \int_{t_F}^{t_F + y} u(t) \cos w_k t dt, \quad (k = 1, 2)$$

где  $y$  время фильтрации определяемое далее,  $t_F$  момент начала фильтрации.

Если выполняются условия строгой ФФ-фильтруемости испытательного сигнала и внешнего возмущения, то оценки (12) сходятся к истинным значениям. Условие строгой ФФ-фильтруемости означает, что внешнее возмущение  $f(t)$  не содержит частот испытательного сигнала. Это условие может быть проверено экспериментально и при его нарушении необходимо изменить частоты испытательного сигнала  $w_1$  и  $w_2$  так, чтобы оно выполнялось.

Коэффициенты объекта (1) и выходы фильтров Фурье (12) при  $y \in \Gamma$  связаны соотношениями [9]

$$(13) \quad T^2 = \frac{(a_2^2 + b_2^2) - (a_1^2 + b_1^2)}{w_1^2(a_1^2 + b_1^2) - w_2^2(a_2^2 + b_2^2)}, \quad K^2 = (a_2^2 + b_2^2)(T^2 w_2^2 + 1),$$

$$(14) \quad t = - \frac{1}{w_1} \arctg \frac{b_1 + T a_1 w_1}{a_1 - T b_1 w_1},$$

$$(15) \quad w_1 t < \frac{p}{2}$$

где

$$(16) \quad a_k = \frac{\hat{a}_{yk} \hat{a}_{uk} + \hat{b}_{yk} \hat{b}_{uk}}{\hat{a}_{uk}^2 + \hat{b}_{uk}^2}, \quad b_k = \frac{-\hat{a}_{yk} \hat{b}_{uk} + \hat{b}_{yk} \hat{a}_{uk}}{\hat{a}_{uk}^2 + \hat{b}_{uk}^2}, \quad (k = 1, 2)$$

Окончание фильтрации Фурье (12) происходит, по истечении времени ( $t > \psi$ ), либо если выполнено условие

$$(17) \quad \left| \frac{\hat{a}_k^{t_{p+1}} - \hat{a}_k^{t_p}}{\hat{a}_k^{t_{p+1}}} \right| \geq q, \quad \left| \frac{\hat{b}_k^{t_{p+1}} - \hat{b}_k^{t_p}}{\hat{b}_k^{t_{p+1}}} \right| \geq q, \quad (k = 1, 2), \quad \left| \frac{\hat{T}^{t_{p+1}} - \hat{T}^{t_p}}{\hat{T}^{t_{p+1}}} \right| \geq q, \quad \left| \frac{\hat{K}^{t_{p+1}} - \hat{K}^{t_p}}{\hat{K}^{t_{p+1}}} \right| \geq q, \quad (p = \overline{1, m})$$

где  $\hat{a}_k^{t_p}, \hat{b}_k^{t_p}, \hat{T}^{t_p}, \hat{K}^{t_p}$  значения оценок, найденные в момент времени  $t_p$ ,  $\hat{a}_k^{t_{p+1}}, \hat{b}_k^{t_{p+1}}, \hat{T}^{t_{p+1}}, \hat{K}^{t_{p+1}}$  значения оценок, найденные в момент времени  $t_{p+1}$  ( $t_p < t_{p+1} < \dots < \psi$ ),  $m$  необходимое число оценок,  $q$  заданное положительное число.

#### 4. Алгоритм самонастройки

##### 4.1 И-регулятор

Может случиться так, что при переходе объекта на следующий режим система объект (1) и ПИД-регулятор (2) потеряет устойчивость, для избежание потери управления объект замыкается И-регулятором следующего вида

$$(18) \quad \dot{u} = k_{ic} e$$

где  $k_{ic}$  коэффициент И-регулятора.

Коэффициент  $k_{ic}$  И-регулятора вычисляется на основе заданных границ (4). На всех режимах кроме первого И-регулятор подключается по следующему логическому условию: если  $|y| \geq y^*$ , где  $y^*$  - заданное значение, то подключить И-регулятор, осуществить идентификацию, после окончания которой подключить ПИД-регулятор. В первом режиме сразу подключается И-регулятор, выполняется идентификация, после окончания которой подключается ПИД-регулятор. Если выполняется логическое условие  $|y| < y^*$ , то функционирует ПИД-регулятор.

##### 4.2 Частоты и настройка амплитуд испытательного сигнала

Частоты испытательного сигнала определяются следующим образом

$$(19) \quad w_1 = \min \left\{ \frac{M}{H}, \frac{1}{T}, \frac{1}{T_0} \right\}, \quad w_2 = \frac{1}{T}$$

При таком выборе частот требование (15) выполняется и запаздывание определяется однозначно на частоте  $\omega_1$ . Если частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  слишком далеки друг от друга, то возможно применение алгоритма для определения испытательной частоты описанного в [10].

Амплитуды вычисляются на основе соотношения

$$(20) \quad r_k = r_b \Psi_{w_k}, \quad (k = \overline{1, m})$$

где  $r_b$  базовая амплитуда. Начальное значение амплитуд вычисляется при произвольно выбранной  $r_b$ .

Настройка амплитуд испытательного сигнала выполняется путем настройки базовой амплитуды  $r_b$  таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$(20) \quad K_v = K_v^* + D$$

где  $K_v^*$  заданный коэффициент влияния испытательного сигнала,  $D$  малое по модулю число.

*Примечание.* Для быстрой настройки амплитуд испытательного сигнала при реализации на электронно-вычислительной машине рекомендуется выбирать  $r_b$  соответствующее выходному напряжению цифро-аналогового преобразователя, на котором не сильно сказываются помехи вносимые преобразователем.

#### 4.3 Алгоритм самонастройки ПИД-регулятора

Процедура самонастройки ПИД-регулятора:

1. Замкнуть объект И-регулятором и настроить амплитуды испытательного сигнала;
2. Идентифицировать объект в системе с И- или ПИД-регулятором, используя испытательный сигнал с частотами (19) и настроенными амплитудами, далее
  - а) приложить его выход и вход к входам фильтра Фурье (12), чьи выходы при заданном значении  $u$ , либо при выполнении (17), дают Фурье коэффициенты,
  - б) вычислить оценки коэффициентов объекта используя формулы (16) и (15), (14), (13);
3. Замкнуть объект ПИД-регулятором, с коэффициентами рассчитанными по формулам (9), где  $K = \hat{K}$ ,  $T = \hat{T}$ ,  $t = \hat{t}$ .

### 5. Результаты экспериментов

На промышленном контроллере WinCon [11], снабженном цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователями, был реализован предлагаемый самонастраивающийся ПИД-регулятор. Эксперименты проводились на стенде полунатурных испытаний. В качестве объекта выступал промышленный компьютер Athena [12], который так же снабжен цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователями.

Рассмотрим многорежимный объект, коэффициенты в каждом из режимов которого даны в таблице 1.

Таблица 1. – Режимы работы объекта

Номер режима	$K$	$T$	$t$
1	6,14	7,68	0,62
2	4,77	2,49	0,47
3	3,75	4,61	1,75
4	1,78	18,70	1,16
5	2,56	5,88	1,33
6	6,95	9,08	0,38
7	6,80	5,59	1,25
8	3,97	16,40	1,27
9	2,08	21,97	0,10
10	4,23	4,36	1,48

Длительность каждого режима 1400с, внешнее возмущение  $f(t) = \text{sign}(\sin 2t)$ .

Из таблицы нетрудно видеть, что границы (1.4) возможных значений коэффициентов объекта имеют следующие значения  $\underline{K} = 1.78$ ,  $\overline{K} = 6.95$ ,  $\underline{T} = 2.49$ ,  $\overline{T} = 21.97$ ,  $\underline{t} = 0.1$ ,  $\overline{t} = 1.48$ .

Во всех режимах испытательный сигнал содержал имел вид (3.1). Частоты которого были вычислены на основе заданных границ, используя формулу (4.2), и составили  $w_1 = 0.0455$   $w_2 = 0.4$ . Амплитуды настраивались по заданному  $K_v^* = 1.2$ . Число  $l$  в формулах (2.1) составляло 0.4.

Результаты самонастройки (для сравнения приведены точные значения коэффициентов) максимальная ошибка слежения и время самонастройки приведены в таблице 2. В режимах 1, 5, 7 и 10 в процессе самонастройки использовался И-регулятор, что обозначено выделенными строками.

Таблица 2. – Результаты самонастройки

Номер режима	$K$	$\hat{K}$	$T$	$\hat{T}$	$t$	$\hat{t}$	$e_{max}, t_i, t_{сам}$	$t_{сам}, ед. вр.$
1	6,14	5,98	7,68	8,30	0,62	0,35	0,35	1104
2	4,77	4,93	2,49	2,83	0,47	0,32	0,32	1104
3	3,75	3,67	4,61	5,04	1,75	1,43	1,43	1104
4	1,78	2,03	18,70	18,57	1,16	1,06	1,06	1173
5	2,56	2,47	5,88	6,31	1,33	1,05	1,05	1104
6	6,95	6,61	9,08	9,55	0,38	0,15	0,15	1104
7	6,8	7,03	5,59	6,17	1,25	0,85	0,85	1104
8	3,97	4,01	16,40	16,89	1,27	1,02	1,02	1173
9	2,08	1,98	21,97	21,12	0,10	0,58	0,58	1173
10	4,23	4,15	4,36	4,85	1,48	0,99	0,99	1104

### Заключение

В работе предложен самонастраивающийся ПИД-регулятор СН-ПИД-1, предназначенный для управления объектами с запаздыванием при воздействии интенсивных внешних возмущений. Параметры объекта могут значительно изменяться при переходе с режима на режим. Режимы работы объекта изменяются с течением времени. СН-ПИД-1 эффективно настраивает ПИД-регулятор на изменяющийся объект, благодаря использованию метода конечно-частотной идентификации с самонастройкой амплитуд испытательного сигнала. Метод синтеза ПИД-регулятора обеспечивает переходный процесс в системе близкий к аperiodическому. Экспериментальные исследования, приведенные в статье, демонстрируют высокую эффективность СН-ПИД-1. Регулятор одинаково хорошо функционирует при различных внешних возмущениях и обеспечивает достижение поставленной цели.

### Литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2004
2. Мазуров В.М., Литюга А.В., Спицын А.В. Развитие технологий адаптивного управления в SCADA системе TRACE
3. Kraus, T.W. and Myron, T.J., Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach, *Control Eng.*, June, 106, 1984.
4. Astrom, K.J., Hagglund, T., Hang, C.C., and Ho, W.K., Automatic tuning and adaptation for PID controllers – A survey, *Control Eng. Prac.*, 1(4), 699, 1993.
5. Александров А.Г., Паленов М.В., Резков И.Г., Адаптивный ПИД-регулятор для многорежимного объекта, в редакции журнала «Автоматизация в промышленности»

6. *Rivera D.E., M. Morari, and S. Skogestad.* Internal model control—4. PID controller design. / *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 1986, 25, pp 252-265.
7. *Visioli A.*, 2002. Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID Controllers. 15th Triennial World Congress, Barcelona, Preprints, Spain.
8. *Льюнг Л.*, «Идентификация систем». М.: Наука, 1991, 432с.
9. *Александров А. Г.*, 2007. *Адаптивное управление объектом с запаздыванием*, Труды IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением", посвященной 105 - летию Н.Г. Четаева, том 3, Управление и оптимизация, стр. 6-13, Иркутск.
10. *Александров А.Г., Орлов Ю.Ф.*, ADAPLAB-M: директива для идентификации с самонастройкой испытательного сигнала // Труды международной конференции "ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ", Москва, 2005, ИПУ, CD-ROM:ISBN 5-201-14948-0, 1-10
11. W-8x4x Hardware Specification, 2009. [online]. URL: [http://www.icpdas.com/products/PAC/wincon-8000/8x4x\\_hardware\\_specification.htm](http://www.icpdas.com/products/PAC/wincon-8000/8x4x_hardware_specification.htm). [Date visited: 01 February 2009].
12. DIAMOND SYSTEMS CORPORATION, 2009. [online]. URL: <http://www.diamondsystems.com/products/athena>. [Date visited: 01 February 2009].