

IX Всероссийская школа-конференция
молодых ученых

У П Р А В Л Е Н И Е БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

ТОМ 1



ЛИПЕЦК,
21-24 мая 2012 г.

УДК 007
ББК 22.18
У677

У677 Управление большими системами: материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 1/ Липецкий государственный технический университет. – Тамбов-Липецк: Изд-во Першина Р.В., 2012. – 243 с.

Представлены материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами», проходившей 21-24 мая 2012 г. в г. Липецк.

В сборник включены научные статьи молодых ученых по фундаментальным математическим основам теории управления, управлению организационными и социально-экономическими системами.

*Издано при поддержке
компаний «ИНТАРО» и ООО «Рэдком».*

- © Липецкий государственный технический университет, 2012
- © Издательство Першина Р.В., 2012

ISBN 978-5-91253-433-1
ISBN 978-5-91253-434-8, Том 1

IX ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ»

организована Институтом проблем управления РАН, сетью Научно-образовательных центров проблем управления и Липецким государственным техническим университетом, совместно с рядом ведущих научно-исследовательских институтов и вузов России, с целью развития и пропаганды достижений теории и практики управления большими системами.

Основные направления конференции:

- Фундаментальные математические основы теории управления.
- Управление организационными и социально-экономическими системами.
- Информационные технологии и фундаментальные основы проектирования информационных систем в управлении.
- Управление качеством.
- Электротехнические системы и комплексы
- Управление техническими системами, технологическими процессами и промышленными установками.

ОБЩЕЕ РУКОВОДСТВО

Васильев С.Н., академик РАН (Москва, директор ИПУ РАН),
Погодаев А.К., д.т.н., проф. (Липецк, ректор ЛГТУ).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Новиков Д.А., чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. (Москва, ИПУ РАН) – сопредседатель,
Погодаев А.К., д.т.н., проф. (Липецк, ЛГТУ) – сопредседатель,
Wignham K., проф. (Великобритания, Университет Ковентри),
Варкалов С.А., д.т.н., проф. (Воронеж, ВГАСУ)
Влюмин С.Л., д.ф.-м.н., проф. (Липецк, ЛГТУ),
Бурков В.Н., д.т.н., проф. (Москва, ИПУ РАН),
Бурковский В.Л., д.т.н., проф. (Воронеж, ВГТУ),
Володин И.М., д.т.н., проф. (Липецк, ЛГТУ),
Воронин А.А., д.ф.-м.н., проф. (Волгоград, ВолГУ),
Головинский П.А., д.ф.-м.н., проф. (Воронеж, ВГАСУ),
Засканов В.Г., д.т.н., проф. (Самара, СГАУ),
Емельянов С.Г., д.т.н., проф. (Курск, ЮЗГУ),
Еременко Ю.И., д.т.н., проф. (Старый Оскол, СТИ),

УДК 62-51

АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ДЛЯ САМОНАСТРАИВАЮЩЕГОСЯ ПИД/И РЕГУЛЯТОРА

Александров А. Г., Паленов М. В.

Москва, ФГБУ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Аннотация

Предлагается алгоритм настройки испытательного сигнала для самонастраивающегося ПИД/И регулятора основанного на методе конечно-частотной идентификации, использующем испытательный сигнал. Кратко описывается самонастраивающийся ПИД/И регулятор. Приводятся результаты экспериментов с новым алгоритмом.

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления (ОУ), описываемый уравнением

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

где $y(t)$ и $u(t)$ – выход и вход (управление) ОУ соответственно, $f(t)$ – не измеряемое неизвестное внешнее возмущение ($|f(t)| \leq f^*$), i – номер режима работы ОУ ($i = 1, 2, \dots, N$). Коэффициенты $k_p^{[i]}$, $T^{[i]}$, $\tau^{[i]}$ – известные числа, меняющиеся в известные (для простоты) моменты времени $t^{[1]}$, $t^{[2]}$, ..., $t^{[N]}$, и постоянны на каждом i -ом режиме.

Возможные значения коэффициентов лежат в интервалах:

$$\underline{k}_p \leq k_p^{[i]} \leq \overline{k}_p, \quad \underline{T} \leq T^{[i]} \leq \overline{T}, \quad \underline{\tau} \leq \tau^{[i]} \leq \overline{\tau}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где нижние (\underline{k}_p , \underline{T} , $\underline{\tau}$) и верхние (\overline{k}_p , \overline{T} , $\overline{\tau}$) границы – известные положительные числа.

ПИД-регулятор имеет вид

$$g^{[i]}\dot{u}(t) + u(t) = k_c^{[i]}\varepsilon^{[i]}(t) + k_i^{[i]} \int_0^t \varepsilon^{[i]}(\tilde{t})d\tilde{t} + k_d^{[i]}\dot{\varepsilon}^{[i]}(t), \quad (3)$$

$$t_{st}^{[i]} \leq t < t^{[i+1]}, \quad t^{[i]} \leq t_{st}^{[i]} < t^{[i+1]}, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

$$\varepsilon^{[i]}(t) = y_{sp}^{[i]} - y(t) + v^{[i]}(t), \quad (4)$$

где $g^{[i]}$, $k_c^{[i]}$, $k_i^{[i]}$, $k_d^{[i]}$ – коэффициенты ПИД-регулятора, изменяющиеся в моменты времени $t_{st}^{[i]}$, $\varepsilon(t)$ – ошибка слежения, $y_{sp}^{[i]}$ – задающее воздействие, $v(t)$ – испытательный сигнал, представляющий собой сумму двух гармоник:

$$v^{[i]}(t) = \rho_1^{[i]} \sin \omega_1 t + \rho_2^{[i]} \sin \omega_2 t, \quad (5)$$

где $\rho_k^{[i]}$ и ω_k ($k = 1, 2$) – положительные числа. Частоты кратны между собой $\omega_2 = \mu\omega_1$ ($2 < \mu < \infty$, μ – целое число).

Задающее воздействие $y_{sp}^{[i]}$ известно и постоянно на каждом i -ом режиме работы ОУ.

Цель адаптивного управления записывается для ошибки слежения (4):

$$|\varepsilon^{[i]}(t)| = |\varepsilon^{[i]*}(t)| + |\xi^{[i]}(t)|, \quad t \geq t_{st}^{[i]}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где $|\varepsilon^{[i]*}(t)|$ – достижимые на каждом режиме ошибки слежения (идеальные ошибки слежения) достигаемые в том случае, если ПИД-регулятор (3) синтезирован по точно известным параметрам модели ОУ, $|\xi^{[i]}(t)|$ – функции, соответствующие условиям:

$$|\xi^{[i]}(t)| < q|\varepsilon^{[i]*}(t)|, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

где q – достаточно малое положительное число.

ОУ, в $(i+1)$ -ом режиме замкнутый ПИД-регулятором, может потерять устойчивость. В этом случае, для обеспечения нормального функционирования ОУ, ПИД-регулятор отключается, а вместо него, с целью настройки ПИД-регулятора, подключается И-регулятор:

$$u(t) = k_i \int_{t_0}^t \varepsilon(t)dt \quad (8)$$

где k_i – коэффициент постоянный для всех режимов, выбираемый из условия устойчивости ОУ, замкнутого И-регулятором, при любой вариации параметров в пределах границ (2).

Влияние испытательного сигнала $v^{[i]}(t)$ на вход и выход ОУ ограничено на каждом режиме его работы:

$$y_v^{[i]} \leq y_-, \quad u_v^{[i]} \leq u_-, \quad (9)$$

где

$$y_v^{[i]} = \max |y(t) - \bar{y}(t)|, \quad u_v^{[i]} = \max |u(t) - \bar{u}(t)|, \quad t^{[i]} \leq t < t_{st}^{[i]}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

$\bar{y}(t)$ и $\bar{u}(t)$ – выход и вход ОУ при отсутствии испытательного сигнала ($v(t) = 0$), y_- и u_- – заданные положительные числа.

Задача настраивать испытательный сигнал $v^{[i]}(t)$ на каждом режиме работы ОУ перед проведением адаптации ПИД-регулятора.

Самонастройка ПИД-регулятора с помощью конечно-частотной идентификации

Коэффициенты ПИД-регулятора вычисляются на основе параметров (k_p, T, τ) модели ОУ (1) [1]:

$$k_c^{[i]} = \frac{2T^{[i]} + \tau^{[i]}}{2k_p^{[i]}(\lambda^{[i]} + \tau^{[i]})}, \quad k_i^{[i]} = \frac{1}{k_p^{[i]}(\lambda^{[i]} + \tau^{[i]})},$$

$$k_d^{[i]} = \frac{T^{[i]}\tau^{[i]}}{2k_p^{[i]}(\lambda^{[i]} + \tau^{[i]})}, \quad g^{[i]} = \frac{\lambda^{[i]}\tau^{[i]}}{2(\lambda^{[i]} + \tau^{[i]})}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

где $\lambda^{[i]}$ – параметр синтеза, влияющий на быстродействие замкнутой системы и выбираемый из условия $\lambda^{[i]} = \frac{T^{[i]}}{\phi}$ при $\phi = 2 \div 4$ [1].

С таким ПИД-регулятором замкнутая система (1), (3), (4) с точностью до ПАДЕ-аппроксимации первого порядка описывается дифференциальным уравнением

$$\lambda^{[i]}\dot{y}(t) + y(t) = y_{sp}(t - \tau^{[i]}). \quad (12)$$

Для определения оценок параметров модели ОУ на каждом i -ом режиме работы ОУ используется метод конечно-частотной идентификации [4], преимуществом которого является то, что метод рассчитан на функционирование в условиях неизвестных ограниченных внешних возмущений. Рассмотрим этот метод подробнее.

На вход замкнутой системы подается испытательный сигнал (5), а вход и выход ОУ прикладываются к фильтру Фурье:

$$\hat{\alpha}_{yk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}\bar{t}^{[i]}} \int_{t_F^{[i]}}^{t_F^{[i]} + \bar{t}^{[i]}} y(t) \sin \omega_k t dt, \quad \hat{\beta}_{yk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}\bar{t}^{[i]}} \int_{t_F^{[i]}}^{t_F^{[i]} + \bar{t}^{[i]}} y(t) \cos \omega_k t dt,$$

$$\hat{\alpha}_{uk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}\bar{t}^{[i]}} \int_{t_F^{[i]}}^{t_F^{[i]} + \bar{t}^{[i]}} u(t) \sin \omega_k t dt, \quad \hat{\beta}_{uk}^{[i]} = \frac{2}{\rho_k^{[i]}\bar{t}^{[i]}} \int_{t_F^{[i]}}^{t_F^{[i]} + \bar{t}^{[i]}} u(t) \cos \omega_k t dt, \quad (13)$$

$$k = 1, 2, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где $\bar{t}^{[i]}$ – длительность фильтрации, $t_F^{[i]}$ – время начала фильтрации. Числа $\hat{\alpha}_{yk}^{[i]}$, $\hat{\beta}_{yk}^{[i]}$, $\hat{\alpha}_{uk}^{[i]}$, $\hat{\beta}_{uk}^{[i]}$ ($k = 1, 2$) являются оценками частотных параметров замкнутой системы

$$\alpha_{yk}^{[i]} + j\beta_{yk}^{[i]} = \frac{W_c^{[i]}(j\omega_k)W_p^{[i]}(j\omega_k)}{1 + W_c^{[i]}(j\omega_k)W_p^{[i]}(j\omega_k)}, \quad \alpha_{uk}^{[i]} + j\beta_{uk}^{[i]} = \frac{W_c^{[i]}(j\omega_k)}{1 + W_c^{[i]}(j\omega_k)W_p^{[i]}(j\omega_k)}, \quad (14)$$

$$k = 1, 2, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где $W_p(j\omega)$ – частотная передаточная функция объекта, $W_c(j\omega)$ – частотная передаточная функция регулятора.

Оценки параметров модели ОУ (1) вычисляются следующим образом

([2]) (для упрощения записи индекс $[i]$ опущен):

$$T^2 = \frac{(\alpha_2^2 + \beta_2^2) - (\alpha_1^2 + \beta_1^2)}{\omega_1^2(\alpha_1^2 + \beta_1^2) - \omega_2^2(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, \quad k_p^2 = (\alpha_2^2 + \beta_2^2)(T^2\omega_2^2 + 1),$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_1} \operatorname{atan} \frac{T\omega_1\alpha_1 + \beta_1}{T\omega_1\beta_1 - \alpha_1}, \quad \omega_1\tau < \frac{\pi}{2}$$

и/или

$$\alpha_k^{[i]} = \frac{\hat{\alpha}_{yk}^{[i]}\hat{\alpha}_{uk}^{[i]} + \hat{\beta}_{yk}^{[i]}\hat{\beta}_{uk}^{[i]}}{(\hat{\alpha}_{uk}^{[i]})^2 + (\hat{\beta}_{uk}^{[i]})^2}, \quad \beta_k^{[i]} = \frac{-\hat{\alpha}_{yk}^{[i]}\hat{\beta}_{uk}^{[i]} + \hat{\beta}_{yk}^{[i]}\hat{\alpha}_{uk}^{[i]}}{(\hat{\alpha}_{uk}^{[i]})^2 + (\hat{\beta}_{uk}^{[i]})^2}, \quad k = 1, 2, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

Подробно самонастраивающийся ПИД/И регулятор, описан в работе [2]. Однако используемый алгоритм настройки амплитуд гармоник испытательного сигнала на совершенен и поэтому в следующем разделе предлагается улучшенный алгоритм, позволяющий сократить время на настройку испытательного сигнала.

Настройка испытательного сигнала

Частоты испытательного сигнала выбираются из условия близости к собственным частотам ОУ [2, 3]:

$$\omega_1 = \frac{1}{2T}, \quad \omega_2 = 2\omega_1. \quad (17)$$

Для изложения алгоритма настройки амплитуд гармоник испытательного сигнала рассмотрим установившийся режим работы (при $t \rightarrow \infty$) замкнутой системы при воздействии испытательного сигнала (5). Вход и выход ОУ при отсутствии внешнего возмущения ($f(t) = 0$) будут иметь вид

$$u(t) = \sum_{k=1}^2 \rho_k(\alpha_{uk}^{[i]} \sin \omega_k t + \beta_{uk}^{[i]} \cos \omega_k t) = \sum_{k=1}^2 \rho_{uk} \sin(\omega_k t + \phi_{uk}),$$

$$y(t) = \sum_{k=1}^2 \rho_k(\alpha_{yk}^{[i]} \sin \omega_k t + \beta_{yk}^{[i]} \cos \omega_k t) = \sum_{k=1}^2 \rho_{yk} \sin(\omega_k t + \phi_{yk}),$$

где

$$\rho_{uk} = \rho_k \sqrt{(\alpha_{uk}^{[i]})^2 + (\beta_{uk}^{[i]})^2}, \quad \rho_{yk} = \rho_k \sqrt{(\alpha_{yk}^{[i]})^2 + (\beta_{yk}^{[i]})^2}, \quad k = 1, 2, \quad (18)$$

амплитуды входа и выхода ОУ.

Если принять

$$\rho_{u1} = \rho_{u2} = \frac{1}{2}u_- \quad \text{и} \quad \rho_{y1} = \rho_{y2} = \frac{1}{2}y_-,$$

то, имея в виду (18), получим

$$\rho_k^{[i]} = \frac{1}{2} \min \left\{ \frac{u_-}{\sqrt{(\alpha_{uk}^{[i]})^2 + (\beta_{uk}^{[i]})^2}}, \frac{y_-}{\sqrt{(\alpha_{yk}^{[i]})^2 + (\beta_{yk}^{[i]})^2}} \right\}, \quad (19)$$

$k = 1, 2.$

Частотные параметры замкнутой системы, используемые в (19), оцениваются с помощью фильтра Фурье (13). Таким образом, выражения (19) примут вид

$$\rho_k^{[i]} = \frac{1}{2} \min \left\{ \frac{u_-}{\sqrt{(\hat{\alpha}_{uk}^{[i]})^2 + (\hat{\beta}_{uk}^{[i]})^2}}, \frac{y_-}{\sqrt{(\hat{\alpha}_{yk}^{[i]})^2 + (\hat{\beta}_{yk}^{[i]})^2}} \right\}. \quad (20)$$

Амплитуды гармоник испытательного сигнала настраиваются по следующему алгоритму.

(1) Задаться малыми значениями ρ_k ($k = 1, 2$) амплитуд испытательного сигнала, такими, чтобы были выполнены условия (9) и вычислить оценки частотных параметров замкнутой системы с помощью фильтра Фурье (13).

(2) Определить амплитуды гармоник испытательного сигнала с помощью формулы (20).

После настройки испытательного сигнала, производится идентификация модели ОУ с использованием только что настроенного испытательного сигнала.

Результаты экспериментов

Передаточная функция ОУ имеет вид:

$$w_p(s) = \frac{k_p^{[i]} e^{-\tau^{[i]} s}}{(T_1^* s + 1)(T_1^* s + 1)(T_2^* s + 1)}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (21)$$

где T_1^* и T_2^* – неучтенный при синтезе постоянные времени $T_1^* \leq T_2^* < T$ ($T_1^* = 0.2$ с и $T_2^* = 0.3$ с).

Коэффициенты параметров модели ОУ лежат в интервалах

$$\underline{k}_p = 0.1, \quad \overline{k}_p = 4, \quad \underline{T} = 1, \quad \overline{T} = 8, \quad \underline{\tau} = 0.1, \quad \overline{\tau} = 2,$$

и изменяются в каждом режиме работы ОУ согласно таблице 1.

Таблица 1
Коэффициенты ОУ на каждом режиме

	1	2	3	4	5	6	7	8
k_p	3.51	2.73	2.16	1.05	1.49	3.97	3.89	2.29
T	3.22	1.49	2.20	6.90	2.63	3.69	2.53	6.13
τ	0.61	0.47	1.75	1.16	1.33	0.38	1.25	1.27

Длительность каждого режима – 1400 секунд. Внешнее возмущение $f(t) = 0.5 \operatorname{sign}[\sin 2.1t]$. Частоты испытательного сигнала: $\omega_1 = 0.0625$ рад/с и $\omega_2 = 0.1250$ рад/с. Амплитуды гармоник испытательного сигнала настраивались при ограничениях $y_- = 1$ и $u_- = 2$. ПИД-регулятор синтезировался по формулам (11) при $\lambda^{[i]} = \frac{T^{[i]}}{4}$ ($i = 1, 2, \dots, 8$).

Выход системы показан на рисунке 1 а). Функция $|\xi^{[i]}(t)|$ из (6) ($|\xi^{[i]}(t)| = |e^{[i]}(t) - \varepsilon^{[i]*}(t)|$) показана на рисунке 1 б).

На рисунках 1 в) и 1 г) показана функция $|\xi^{[i]}(t)|$ на 5-м и 6-м режимах соответственно.

Обозначения, используемые на всех рисунках: серые вертикальные линии обозначают моменты времени изменения коэффициентов ОУ – $t^{[i]}$, серые вертикальные штрих-пунктирные линии обозначают моменты окончания самонастройки ПИД-регулятора – $t_{st}^{[i]}$.

И-регулятор подключался 1-м, 3-м и 5-м режимом.

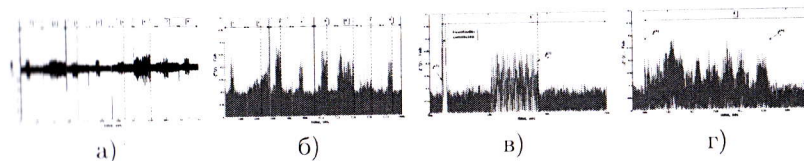


Рис. 1. Результаты эксперимента: а) Выход системы, б) функция $|\xi^{[i]}(t)|$, в) функция $|\xi^{[i]}(t)|$ на 5-м режиме, г) функция $|\xi^{[i]}(t)|$ на 6-м режиме.

Заключение

Предлагается новый алгоритм настройки амплитуд испытательного сигнала для самонастраивающегося ПИД/И регулятора, позволяющий уменьшить время, затрачиваемое на настройку испытательного сигнала.

Литература

- [1] VISIOLI A. Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID controllers // Proc. of 15th Triennial World Congress. – 2002. – P. 666-671.
- [2] АЛЕКСАНДРОВ А. Г., ПАЛЕНОВ М. В. Самонастраивающийся ПИД/И регулятор // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 10. – С. 4-18.
- [3] ALEXANDROV A.G. Finite-frequency identification: selftuning of test signal // Preprints 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic. – 2005. – CD-ROM.
- [4] АЛЕКСАНДРОВ А. Г. Частотное адаптивное управление устойчивым объектом при неизвестном ограниченном возмущении // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 2. – С. 106-116.