

ЧАСТОТНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР

Паленов М. В., Резков И. Г.

Институт Проблем Управления РАН, 65 Профсоюзная, Москва, 117997, Россия
fagoth@mail.ru

Фёдоров А. С.

Электростальский Политехнический Институт филиал Московского Института
Стали и Сплавов (технологический университет), 7 Первомайская, Электросталь,
144000, Россия

Ключевые слова: ПИД-регулятор, частотная идентификация, неизвестное внешнее
возмущение, экспериментальные исследования, промышленный
контроллер.

Аннотация: Приводится алгоритм адаптивного управления многорежимным
объектом второго порядка с запаздыванием. Коэффициенты объекта
неизвестны и могут изменяться через некоторые промежутки времени; на
объект действует внешнее возмущение, которое является неизвестной
функцией.

1. Введение

Самонастраивающиеся и адаптивные ПИ– и ПИД–регуляторы широко
используются в управлении технологическими процессами [1], [2]. Их алгоритмы
базируются на идентификации объекта управления. Часто используются различные
вариации метода наименьших квадратов, работающие с тем предположением, что
внешнее возмущение есть «белый шум» [3]. Но на практике такое предположение
редко выполняется. За последнее десятилетие методы адаптации активно
развивались, теперь внешнее возмущение может представлять собой неизвестную
ограниченную функцию. Для этих случаев алгоритм конечно-частотной
идентификации был предложен в [4], [5]. В [6] алгоритм адаптивного управления для
объекта первого порядка с запаздыванием базируется на методе конечно-частотной
идентификации и синтезе регулятора, взятого из [7]. Такой алгоритм адаптивного
управления был реализован на промышленном контроллере WinCon, результаты
испытаний которого представлены в [8]. В данной статье приводится алгоритм
адаптивного управления многорежимным объектом второго порядка с
запаздыванием, и результаты экспериментального исследования с использованием
промышленного контроллера ОВЕН ПЛК-150.

2. Постановка задачи

Имеется система управления, описываемая уравнениями

$$T_1^{[i]} T_2^{[i]} \ddot{y}(t) + (T_1^{[i]} + T_2^{[i]}) \dot{y}(t) + y(t) = K^{[i]} u(t - \tau^{[i]}) + f(t), \\ t_{i-1} \leq t < t_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$g_2^{[i]} \ddot{u}(t) + g_1^{[i]} \dot{u}(t) + u(t) = k_c^{[i]} \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i^{[i]}} \int_{t_0}^t \varepsilon dt + T_d^{[i]} \frac{d\varepsilon}{dt} + T_{dd}^{[i]} \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = y_{sp} - y(t) + v(t) \quad (3)$$

где $y(t)$ – измеряемый выход объекта (1), $u(t)$ - управление, формируемое регулятором (2) и подаваемое на объект (1), y_{sp} – задающее воздействие, $f(t)$ – неизмеряемое внешнее возмущение, являющаяся неизвестной ограниченной функцией ($|f(t)| \leq f^*$), $v(t)$ – испытательный (идентифицирующий) сигнал, который является известной функцией времени, $\varepsilon(t)$ – ошибка слежения. Коэффициенты объекта (1) ($K^{[i]}$, $T_1^{[i]}$, $T_2^{[i]}$, $\tau^{[i]}$) и регулятора (2) ($k_c^{[i]}$, $T_i^{[i]}$, $T_d^{[i]}$, $T_{dd}^{[i]}$, $g_1^{[i]}$, $g_2^{[i]}$) – неизвестные числа, i – номер режима работы объекта.

Коэффициенты объекта изменяются в моменты времени t_1 , t_2 , \dots , t_N , и постоянны внутри интервалов времени

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

Моменты времени t_1 , t_2 , \dots , t_N полагаются известными. Длина интервалов (4) такова, что $t_{i+1} - t_i > t_{ad}^{[i]}$ ($i = \overline{2, N-1}$), где $t_{ad}^{[i]}$ – время адаптации в i -м режиме ($i = \overline{1, N}$).

Кроме того, предполагается следующее:

- 1) коэффициенты объекта, работающего в первом режиме, известны;
- 2) коэффициенты объекта мало изменяются при переходе объекта с режима на режим так, что регулятор, построенный для i -го режима работы объекта, не нарушает устойчивость системы в $(i+1)$ -ом режиме работы объекта.

Задача состоит в том, чтобы адаптировать коэффициенты регулятора (2) к изменяющимся коэффициентам объекта так, чтобы ошибка слежения на каждом интервале была ограниченной

$$\varepsilon^{[i]}(t) = \varepsilon^{[i]*}(t) + \xi(t), \quad t \geq t_{ad}^{[i]} \quad (5)$$

где $\varepsilon^{[i]*}(t)$ – достижимая ошибка слежения при известных коэффициентах объекта на i -ом режиме, $\xi(t)$ - достаточно малое положительное число.

3. Построение регулятора при известных коэффициентах объекта

Рассмотрим случай, когда коэффициенты объекта (1) известны. Для этого случая разработан ряд методов определения коэффициентов k_c , T_i , T_d , T_{dd} регулятора (2), различающихся моделями целей управления, чувствительностью к внешним возмущениям и т.д.

Ниже используется метод, базирующийся на одном из таких методов, названный методом внутренней модели управления [7]. Для его описания запишем уравнение (2) в дифференциальном виде. Для этого продифференцируем его при нулевых начальных условиях, индекс $[i]$ опустим,

$$g_2 \ddot{u} + g_1 \dot{u} + \dot{u} = r_3 \ddot{\varepsilon} + r_2 \dot{\varepsilon} + r_1 \dot{\varepsilon} + r_0 \varepsilon \quad (6)$$

в котором

$$r_3 = k_c T_{dd}, \quad r_2 = k_c T_d, \quad r_1 = k_c, \quad r_0 = \frac{k_c}{T_i} \quad (7)$$

Передаточная функция замкнутой системы, по выходу от задающего воздействия, имеет вид

$$W_{yy_{sp}}(s) = \frac{r(s)Ke^{-\tau s}}{g(s)(T_1s+1)(T_2s+1)+r(s)Ke^{-\tau s}} \quad (8)$$

где $r(s)$ и $g(s)$ - полиномы регулятора (6).

Показано, что если полиномы $r(s)$ и $g(s)$ имеют следующий вид

$$r(s) = (T_1s+1)(T_2s+1)\left(\frac{\tau}{2}s+1\right), \quad g(s) = Ks\left[\frac{\lambda c \tau}{2}s^2 + \left(\frac{\lambda \tau}{2} + \frac{c \tau}{2} + c\lambda\right)s + (\lambda + c + \tau)\right], \quad (9)$$

тогда передаточная функция замкнутой системы (8), с точностью до ПАДЕ-аппроксимации первого порядка, записывается как

$$W_{yy_{sp}}(s) \cong \frac{e^{-\tau s}}{(\lambda c s^2 + (\lambda + c)s + 1)}, \quad (10)$$

где λ и c положительные числа, характеризующие быстродействие системы. Тогда искомые коэффициенты регулятора (6) выражаются как

$$g_2 = \frac{\lambda c \tau}{2(\lambda + c + \tau)}, \quad g_1 = \frac{\frac{\lambda \tau}{2} + \frac{c \tau}{2} + c\lambda}{(\lambda + c + \tau)}, \quad (11)$$

$$r_3 = \frac{T_1 T_2 \frac{\tau}{2}}{k(\lambda + c + \tau)}, \quad r_2 = \frac{(T_1 + T_2) \frac{\tau}{2} + T_1 T_2}{k(\lambda + c + \tau)}, \quad r_1 = \frac{T_1 + T_2 + \frac{\tau}{2}}{k(\lambda + c + \tau)}, \quad r_0 = \frac{1}{k(\lambda + c + \tau)},$$

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к идентификации объекта, результатом которой являются оценки коэффициентов объекта $\hat{K}^{[i]}, \hat{T}_1^{[i]}, \hat{T}_2^{[i]}, \hat{\tau}^{[i]}$, которые используются для построения регулятора на основе выражений (11) на каждом режиме работы объекта.

4. Идентификация объекта

Для идентификации используется метод конечно-частотной идентификации [9], в соответствии с которым испытательный сигнал имеет вид

$$v = \rho_1 \sin \omega_1 t + \rho_2 \sin \omega_2 t + \rho_3 \sin \omega_3 t, \quad (12)$$

где ρ_k и ω_k ($k=1,2,3$) - положительные числа.

Амплитуды ρ_k ($k=1,2,3$) этого сигнала полагаются заданными.

Частоты ω_k ($k=1,2,3$) определяются следующим образом

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1}, \quad \omega_2 = \frac{1}{T_2}, \quad \omega_3 = \frac{1}{\tau} \quad (13)$$

Аналогично [6] получим следующие выражения для оценок коэффициентов объекта (1)

$$d_2^2 = \frac{(\gamma_2^2 - \gamma_1^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_3^2 \gamma_3^2) - (\gamma_3^2 - \gamma_1^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_2^2 \gamma_2^2)}{(\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_2^4 \gamma_2^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_3^2 \gamma_3^2) - (\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_3^4 \gamma_3^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_2^2 \gamma_2^2)}, \quad (14a)$$

$$d_1^2 = \frac{(\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_2^4 \gamma_2^2)(\gamma_3^2 - \gamma_1^2) - (\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_3^4 \gamma_3^2)(\gamma_2^2 - \gamma_1^2)}{(\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_2^4 \gamma_2^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_3^2 \gamma_3^2) - (\omega_1^4 \gamma_1^2 - \omega_3^4 \gamma_3^2)(\omega_1^2 \gamma_1^2 - \omega_2^2 \gamma_2^2)} + 2d_2, \quad (14b)$$

$$K^2 = \gamma_1^2 + d_2 \omega_1^4 \gamma_1^2 + (d_1^2 - 2d_2) \omega_1^2 \gamma_1^2, \quad (14c)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_3} \arccos \frac{\alpha_3 - \alpha_3 d_2 \omega_3^2 - \beta_3 d_3 \omega_3}{K}, \quad (14d)$$

где

$$d_1 = T_1 + T_2, \quad d_2 = T_1 \cdot T_2, \quad (15)$$

$$\gamma_k^2 = \alpha_k^2 + \beta_k^2, \quad (k=1,2,3) \quad (16)$$

$$\alpha_k = \frac{a_{yk} a_{uk} + b_{yk} b_{uk}}{a_{uk}^2 + b_{uk}^2}, \quad \beta_k = \frac{-a_{yk} b_{uk} + b_{yk} a_{uk}}{a_{uk}^2 + b_{uk}^2}, \quad (k=1,2,3) \quad (17)$$

$a_{yk}, b_{yk}, a_{uk}, b_{uk}$, ($k = 1, 2, 3$) - выходы фильтра Фурье.

5. Алгоритм адаптации

Алгоритм адаптации состоит из следующих этапов:

- 1) По формулам (11) построить регулятор и по формулам (13) вычислить испытательные частоты для второго режима работы объекта по известным коэффициентам $K^{[1]}, T_1^{[1]}, T_2^{[1]}, \tau^{[1]}$;
- 2) Во втором режиме осуществить идентификацию объекта в системе замкнутой регулятором: приложить его выход и вход к входам фильтра Фурье, чьи выходы дают оценки коэффициентов объекта $\hat{K}^{[2]}, \hat{T}_1^{[2]}, \hat{T}_2^{[2]}, \hat{\tau}^{[2]}$;;
- 3) Вычислить, используя формулы (11), где $K = \hat{K}^{[2]}, T_1 = \hat{T}_1^{[2]}, T_2 = \hat{T}_2^{[2]}, \tau = \hat{\tau}^{[2]}$, коэффициенты регулятора (2).
- 4) Вычислить, используя формулы (13), где $T_1 = \hat{T}_1^{[i]}, T_2 = \hat{T}_2^{[i]}, \tau = \hat{\tau}^{[i]}$ испытательные частоты для третьего режима.
- 5) Заменить коэффициенты регулятора вычисленными, замкнуть объект новым регулятором и так далее для следующих режимов.

Этот алгоритм обеспечивает [9] достижение цели управления (5), если моменты времени (4) достаточно далеки друг от друга.

6. Экспериментальное исследование.

6.1 Экспериментальный стенд

Для экспериментального исследования ЧАР-ПИД-2 был разработан стенд ФМ-2ОВЕН. Он состоит из промышленного контроллера ОВЕН ПЛК-150, содержащего ЦАП и АЦП, и IBM-совместимого одноплатного промышленного компьютера Athena со встроенными ЦАП и АЦП. ЧАР-ПИД-2 работает на промышленном контроллере ОВЕН, а объект имитируется промышленным компьютером Athena.

6.1.1 Имитатор объекта

Имитатор объекта – это программа на языке C++ для промышленного компьютера Athena, имитирующая объект с коэффициентами, приведенными в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры объекта.

Режим работы	K	T ₁ , с	T ₂ , с	τ , с
I	1.5	15	7	3
II	3	21	11	7
III	4.5	25	15	8.5
IV	7	33	20	12

В качестве внешнего возмущения $f(t)$ для простоты использовался случайный процесс типа "белый шум", однако следует заметить, что ЧАР-ПИД-2 работоспособен

и при любых других внешних ограниченных возмущениях. Задающее воздействие выбрано $y_{sp}(t) = 5B$.

6.1.2 Регулятор

ЧАР-ПИД-2 реализован в виде программы для контроллера ОВЕН в среде CoDeSys стандарта МЭК 61131-3.

6.2 Результаты экспериментов

6.2.1 Потеря устойчивости системы без адаптации

Объект, работая последовательно, сменяет режимы с I по IV, замкнут с ПИД-регулятором, коэффициенты которого не изменяются в ходе эксперимента (система без адаптации). Результаты приведены на рис. 1.

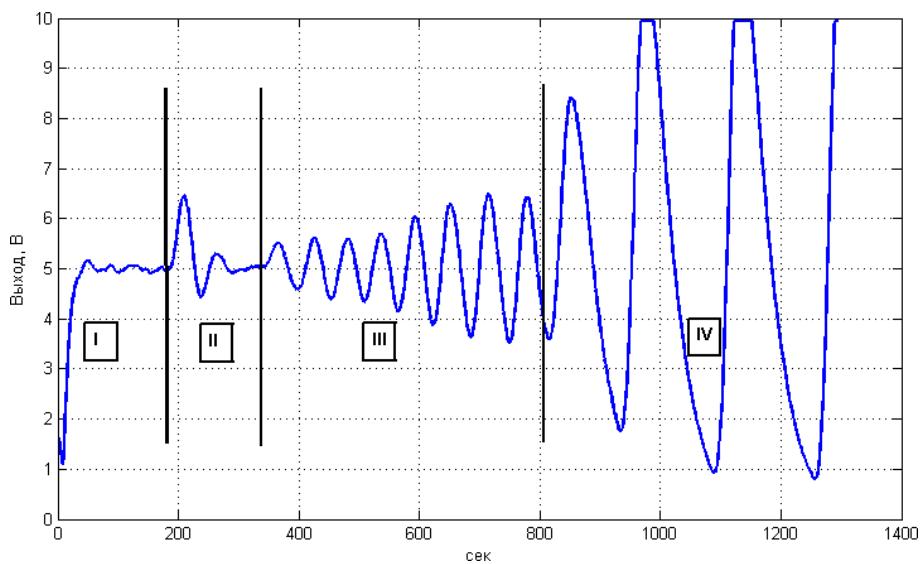


Рис. 1. Результаты эксперимента 1.

На рис. 1 режимы работы объекта обозначены как I, II, III, IV.

Нетрудно видеть, что на III режиме система теряет устойчивость и входит в режим автоколебаний. На IV режиме система неустойчива, и выход объекта входит в насыщение (выход контроллера имеет ограничение 0-10 вольт).

6.2.2 Адаптивное управление

Во втором эксперименте объект работает в режимах с I по IV (в соответствии с Таблицей 1). На рис. 2. показан выход системы при работе регулятора последовательно во всех режимах работы объекта.

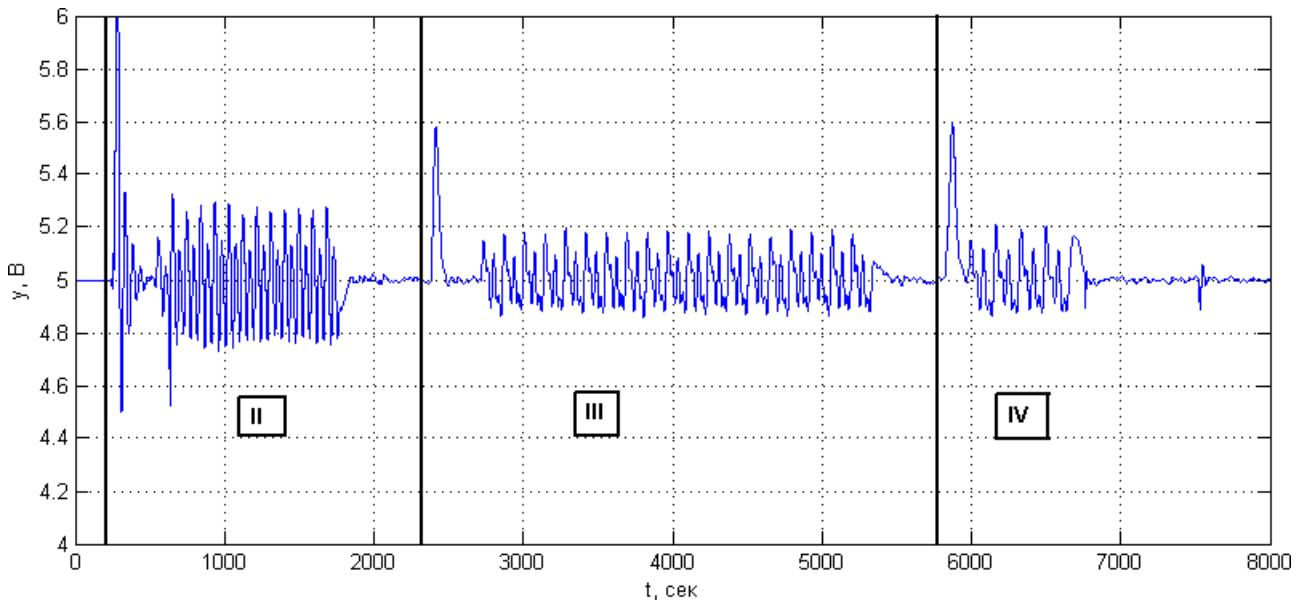


Рис. 2. Выход системы при работе объекта последовательно в режимах с I по IV

Нетрудно видеть, что после введения адаптации на всех четырех режимах объекта сохраняется устойчивость замкнутой системы.

6.2.3 Пример адаптации на одном режиме работы объекта

Регулятор ЧАР-ПИД-2 работает по алгоритму, приведенному выше. Результаты эксперимента приведены на рис. 3

На рис. 3 показано поведение системы в IV режиме объекта. В секции IVa коэффициенты регулятора те же, что и в III режиме объекта; в части IVb осуществляется идентификация объекта в замкнутой системе; в части IVc регулятор перестроен для IV режима объекта.

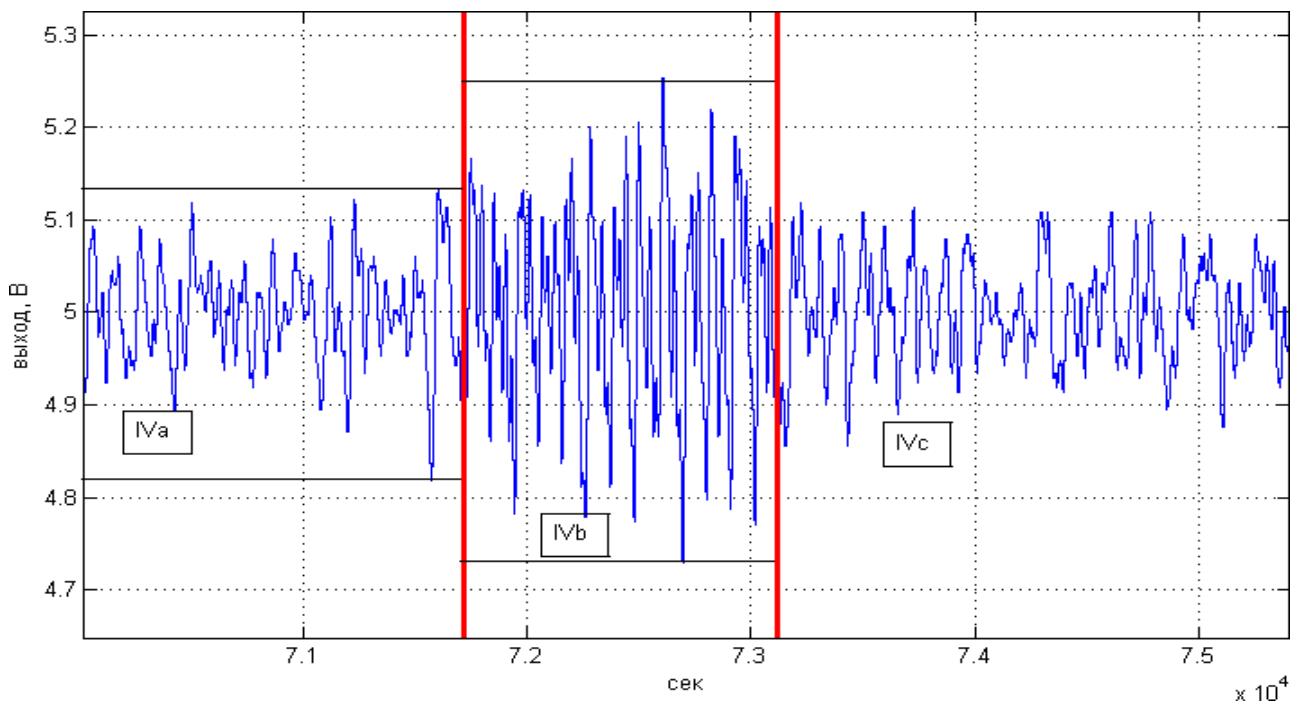


Рис. 3. Выход объекта при адаптации на четвертом режиме работы объекта.

Заключение. Приведенный алгоритм идентификации объекта второго порядка с запаздыванием показал высокую эффективность в стабилизации многорежимного объекта. Достоинством регулятора является идентификация объекта в замкнутой системе, при этом не происходит сильного нарушения сигнала выхода объекта.

Рекомендации. Для того, чтобы время адаптации было мало, необходимо, чтобы коэффициент влияния испытательного сигнала $K_v^{[i]}$ был как можно больше и наоборот, если требуется минимум влияния испытательного сигнала на ошибку слежения, то в таком случае время адаптации может сильно увеличиться.

Список литературы

1. Voda A. A. and Landau I. D.. *A method for the Auto-calibration of PID Controllers*, Automatica, vol. 31, No 1., 1995, pp. 41-53.
2. Astrom, K. J. and T. Hagglund. *Advanced PID Control*, ISA, 2006.
3. Л. Льюинг. *Идентификация систем: Теория для пользователей*, Москва, «Наука», 1991
4. Александров А. Г.. *Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик*, Известия РАН. "Теория и системы управления", 2, 1995, стр. 63-71.
5. Alexandrov A. G., Baukova N.G.. *Frequencial adaptive PDD – controller*, Proceedings of the UKACC International Conference on Control, Cambridge, 2000.
6. Александров А. Г.. *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, 2007, стр. 6-13, Иркутск.
7. Visioli A.. *Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID Controllers*. 15th Triennial Word Congress, Barcelona, Preprints, Spain, 2002.
8. А.Г. Александров, И.Г. Резков, М.В. Паленов. Частотный адаптивный ПИД-регулятор: ЧАР-ПИД-W1. Материалы 33 Международного семинара - презентации и выставки. Москва, июнь 2009, ИПУ РАН, стр.68-76. CD-ROM ISBN-978-5-91450-029-7.
9. Александров А. Г. Частотное адаптивное управление устойчивым объектом при неизвестном ограниченном возмущении. ж. "Автоматика и телемеханика", РАН, 4, 2000, стр. 106-116