

На правах рукописи

И.Г. Резков

РЕЗКОВ Илья Геннадьевич

**Адаптивные регуляторы с конечно-частотной
идентификацией**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)*

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор
Александров Альберт Георгиевич

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Московского энергетического института

Колосов Олег Сергеевич

к.т.н., доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Трефилов Пётр Анатольевич

Ведущая организация: **ФГБУН Институт системного анализа РАН**

Защита состоится 20 октября 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д002.226.01 при *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук*, расположенном по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ИПУ РАН* и на сайте <http://www.ipu.ru>. Автореферат разослан 5 августа 2014 г. Отзывы и замечания по автореферату просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета в двух экземплярах, заверенные печатью.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.т.н. *Акинфиев В. К.*

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время в промышленности и практике управления широко распространены регуляторы, работающие по закону ПИД (пропорционально–интегрально–дифференциальному). При изменяющихся параметрах объекта используются адаптивные ПИД–регуляторы. Существующие адаптивные ПИД–регуляторы работоспособны в условиях, когда внешние возмущения, действующие на объект, малы или отсутствуют.

Во многих случаях требуется обеспечить высокую точность регулирования в условиях интенсивных внешних возмущений, действующих на объект. Для обеспечения высокой точности необходимо иметь наиболее полную математическую модель объекта, по которой синтезируется регулятор, обеспечивающий высокую точность регулирования («точностной» регулятор), а для определения параметров объекта необходимо идентифицировать объект. Такая идентификация часто затруднена интенсивными внешними возмущениями, и это становится проблемой для многих существующих подходов. В связи с этим актуальна проблема построения точностного адаптивного регулятора, а также адаптивного ПИД–регулятора, работоспособного в условиях интенсивных внешних возмущений, действующих на объект.

Цели и задачи диссертационной работы состоят в разработке и исследовании адаптивных регуляторов, обеспечивающих заданную точность регулирования в условиях интенсивных внешних возмущений («точностного» адаптивного регулятора), а также разработке и исследовании адаптивного ПИД–регулятора, работоспособного в условиях интенсивных внешних возмущений.

Методология и методы исследования. Достижение цели диссертации обеспечивается применением метода конечно-частотной идентификации объекта, работающего в условиях интенсивных внешних возмущений, что позволяет строить регулятор, обеспечивающий необходимую точность.

Научная новизна. В диссертации получен ряд новых результатов по адаптивным регуляторам:

1. Разработаны адаптивные ПИД-регуляторы ЧАР-ПИД-1, реализованный на контроллере WinCon W-8341, и ПИД/И с конечно-частотной идентификацией. ПИД/И-регулятор внедрён в промышленную установку по производству сверхтвёрдых материалов, проведены испытания.
2. Предложен прямой алгоритм восстановления фазового вектора в будущем времени. Доказано свойство системы с регулятором, использующим полностью наблюдаемый вектор состояния, и с регулятором, использующим предложенный алгоритм восстановления, заключающееся в том, что в этих системах совпадают характеристические полиномы.
3. Разработан алгоритм синтеза точностного регулятора, позволяющий уменьшить влияние ЦАП и АЦП и основанный на изменении структуры функционала оптимизации, отличающегося от известного наличием большего числа членов, имеющих аналог старших производных по управлению.
4. Разработан точностной адаптивный регулятор ЧАР-25 с конечно-частотной идентификацией, реализованный на контроллере WinCon W-8341. Проведены экспериментальные исследования.

Теоретическая и практическая значимость заключается в создании нового типа адаптивных регуляторов, реализованных в промышленных контроллерах и способных функционировать в условиях действия интенсивных внешних возмущений. Эти регуляторы позволяют значительно расширить класс процессов, для которых можно увеличить точность регулирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 33-м международном

семинаре-презентации и выставке «Автоматизация. Программно-технические средства. Системы. Применения» (ИПУ РАН, Москва, 2009); 3-й научной конференции «Автоматизация в промышленности» (ИПУ РАН, Москва, 2009); международной научной конференции «Проблемы управления, передачи и обработки информации» (АТМ-ТКИ-50 (2009), АТМ-2011 (2011), АТМ-2013 (2013), СГТУ, Саратов); Первой традиционной всероссийской молодежной летней школе «Управление, информация и оптимизация» (Переславль-Залесский, 2009); Второй Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ-10 (ИПУ РАН, Москва, 2010); XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, 2010); Международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на Российских предприятиях» (ИПУ РАН, Москва, 2011); Всероссийской научной школе «Управление, информация и оптимизация» (Воронеж, 2011); X Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (Уфа, 2013); научных семинарах по автоматическому управлению под руководством Б.Т. Поляка (ИПУ РАН, Москва); регулятор ЧАР-25, разработанный на основе результатов диссертации, демонстрировался на 61-ой международной выставке «Идеи, изобретения, и инновации» IENA-2009 (Германия, г. Нюрнберг, 2009) с награждением золотой медалью, на международной выставке «SIMO NETWORK» (Испания, г. Мадрид, 2011), на III и IV международном форуме «Exropriority'2011», «Exropriority'2012» (Москва, 2011, 2012) с награждением серебряной медалью; работа «Адаптивный регулятор. Экспериментальные исследования» была награждена дипломом на конкурсе научных работ молодых ученых по теории управления и её приложениям (Москва, 2010).

Достоверность результатов подтверждается результатами численного

моделирования, экспериментальными исследованиями, а также имеющимся актом о внедрении результатов диссертационной работы в систему управления установкой УРС-2 по производству сверхтвёрдых материалов (г. Троицк).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК [1, 2], 1 зарегистрированная программа для ЭВМ [3].

Личный вклад автора. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. В совместно опубликованных работах личный вклад состоит в разработке программного обеспечения, проведении экспериментальных исследований.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (79 источников) и одного приложения. Диссертация содержит 52 рисунка, 5 таблиц; объем работы составляет 93 страницы.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе дан обзор литературы по ПИД-регуляторам и адаптивным регуляторам, обеспечивающим высокую точность, описывается круг нерешённых задач, приводится обоснование выбора идентификационного подхода к адаптивному управлению.

Для управления промышленными объектами широко используются ПИ- и ПИД-регуляторы (Åström, К. J., Hägglund, Т., Ang, К. Н., Chong, G. С. Y., Li, Y.). Часто параметры объекта (его постоянные времени, коэффициент усиления, запаздывание) неизвестны, для их определения применяют различные

методы идентификации. Если внешние возмущения, действующие на объект управления, достаточно малы (по сравнению с допустимым или рабочим диапазонами регулируемой величины), то для идентификации можно использовать переходную или разгонную характеристику объекта (Åström, К. J., Hägglund, Т., В. В. Денисенко, В. Л. Бажанов). Известен метод наименьших квадратов (Åström, К. J., Hägglund, Т.), разработанный для случая аппроксимации внешнего возмущения сигналом типа «белый шум». На практике такой случай, как правило, встречается редко, поэтому разработан метод конечно-частотной идентификации (А. Г. Александров), в котором внешнее возмущение более общего вида. Известны работы, в которых используют испытательный сигнал в виде одной или двух гармоник (В. Я. Ротач), ступенчатый сигнал (В. М. Мазуров, А. М. Шубладзе), что позволяет идентифицировать два или четыре параметра объекта. Известен алгоритм, использующий ступенчатый сигнал, но не использующий аналитическое описание объекта (В. В. Денисенко).

При использовании испытательного сигнала на практике необходимо определённым образом задавать его амплитуды и частоты, чтобы получить достоверный результат. В работах В. Я. Ротача предложен способ определения частоты испытательного сигнала, а в работах В. М. Мазурова этот способ дополнен нахождением его амплитуды.

В частотном адаптивном управлении (А. Г. Александров) цель управления — заданная точность выхода объекта, а внешнее возмущение — произвольная ограниченная функция. В применяемом методе конечно-частотной идентификации используется испытательный сигнал в виде конечной суммы гармоник. Реализация этого подхода началась с регулятора ЧАР-1 (П. А. Трефилов). За последние два десятилетия метод претерпел ряд модификаций, включая алгоритмы настройки амплитуд и частот, а также длительности адаптации (А. Г. Александров, Д. Г. Кариков, Е. Ю. Курицына).

В работе М. В. Паленова ПИД-регулятор расширяется до адаптивного ПИД/И-регулятора, позволяющем при потере устойчивости подключить стабилизирующий И-регулятор и провести идентификацию объекта заново.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию частотного адаптивного ПИД-регулятора.

Объект описывается моделью первого порядка с запаздыванием

$$T^{[m]}\dot{y}(t) + y(t) = K^{[m]}u(t - \tau^{[m]}) + f(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ — измеряемый выход объекта управления, $u(t)$ — управление, формируемое ПИД-регулятором, $f(t)$ — неизмеряемое внешнее возмущение, являющееся неизвестной ограниченной функцией времени ($|f(k)| \leq f^*$, где f^* — заданное число), $K^{[m]}$ — коэффициент передачи объекта, $T^{[m]} > 0$ — постоянная времени объекта, $\tau^{[m]}$ — величина транспортного запаздывания, m — номер режима.

Неизвестные параметры объекта достаточно медленно изменяются (дрейфуют) во времени. Этот дрейф вызван изменением нагрузки на технологический агрегат, качества сырья, используемого в технологическом процессе и т. д. Дрейфующие коэффициенты объекта аппроксимируются кусочно-постоянными функциями времени, а интервал, в течение которого коэффициенты постоянны, называется длительностью режима работы объекта.

Предполагается выполнение следующих условий.

1. Условие смежной устойчивости, означающее что коэффициенты объекта мало изменяются от режима к режиму так, что объект в m -м режиме с регулятором, рассчитанным для объекта режима $(m - 1)$, устойчив. При этом, если не изменять коэффициенты регулятора, при переходе на некоторый последующий режим система может потерять устойчивость.
2. Длительность режимов работы объекта больше, чем интервал времени,

необходимый для адаптации:

$$t_{об}^{[m+1]} > t_{об}^{[m]} + \Delta t_{адап}^{[m]}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $t_{об}^{[m]}$ — момент начала m -го режима работы объекта, $\Delta t_{адап}^{[m]}$ — длительность адаптации на режиме m .

Уравнение реализуемого ПИД-регулятора записывается в следующей форме:

$$g^{[m]}\dot{u} + u(t) = k_p^{[m]} \left(e(t) + \frac{1}{T_i^{[m]}} \int_0^t e(t) dt + T_d^{[m]} \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (3)$$

где $e(t) = y_{уст}^{[m]} - y(t) + v(t)$ — ошибка регулирования, $y_{уст}$ — задающее воздействие (уставка), $v(t)$ — испытательный сигнал

$$v(t) = \sum_{i=1}^n \rho_i \sin(\omega_i t), \quad i = \overline{1, 2}, \quad (4)$$

где ρ_i — амплитуда i -й гармоники, ω_i — её частота. Частоты $\omega_1^{[m]}$ и $\omega_2^{[m]}$ определяются в процессе адаптации как

$$\omega_1^{[m]} = \frac{1}{\hat{T}^{[m-1]}}, \quad \omega_2^{[m]} = \frac{1}{\hat{\tau}^{[m-1]}}, \quad (5)$$

где $\hat{T}^{[m-1]}$ — оценка постоянной времени объекта, $\hat{\tau}^{[m-1]}$ — оценка запаздывания объекта, получаемые на предыдущем режиме работы объекта. Амплитуды $\rho_1^{[m]}$ и $\rho_2^{[m]}$ определяются итеративным методом с учетом знания коэффициентов объекта на предыдущем режиме работы, а также с учетом заданного числа K_v^* — коэффициента влияния испытательного сигнала.

Коэффициенты регулятора находятся к моменту времени $t_{об}^{[m]} + \Delta t_{адап}^{[m]}$. На первом режиме (при $m = 1$) параметры объекта неизвестны, в качестве сигнала управления подаётся испытательный сигнал $u(k) = v(k)$. На последующих режимах на интервалах времени $\left[t_{об}^{[m]}, t_{об}^{[m]} + \Delta t_{адап}^{[m]} \right)$ работает регулятор (3) с коэффициентами из предыдущего режима.

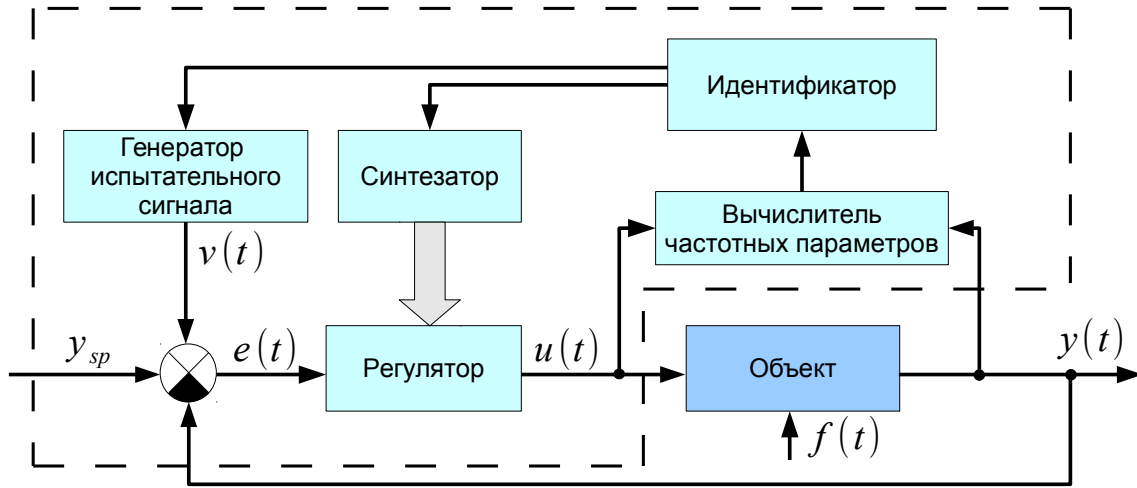


Рис. 1. Структурная схема системы с частотным адаптивным регулятором

Задача состоит в том, чтобы адаптировать ПИД-регулятор к изменяющимся параметрам объекта, так чтобы ошибка слежения при воздействии внешнего возмущения на каждом интервале была ограниченной:

$$|\varepsilon^{[m]}| = |\varepsilon^{[m]*}| + |\xi|, \quad t \geq t^{[m]}, \quad (6)$$

где $\varepsilon^{[m]*}$ — наименьшая достижимая ошибка слежения на m -ом режиме при условии, что коэффициенты объекта известны точно; величина $|\xi|$ значительно меньше $|\varepsilon^{[m]*}|$.

Структурная схема системы с частотным адаптивным ПИД-регулятором представлена на рис. 1.

Вычислитель частотных параметров используется для нахождения частотных параметров объекта

$$\hat{\alpha}_i = \frac{\hat{\alpha}_{yi}\hat{\alpha}_{ui} + \hat{\beta}_{yi}\hat{\beta}_{ui}}{\hat{\alpha}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2}, \quad \hat{\beta}_i = \frac{-\hat{\alpha}_{yi}\hat{\beta}_{ui} + \hat{\beta}_{yi}\hat{\alpha}_{ui}}{\hat{\alpha}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (7)$$

где $\hat{\alpha}_{ui}$, $\hat{\beta}_{ui}$, $\hat{\alpha}_{yi}$, $\hat{\beta}_{yi}$ находятся с помощью фильтра Фурье

$$\hat{\alpha}_{yi} = \alpha_{yi}(N) = \frac{2}{\rho_i N T_{cycle}} \sum_{k=k_0+1}^{k_0+NT_{cycle}} y(k) \sin(\omega_i kh), \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{yi} = \beta_{yi}(N) = \frac{2}{\rho_i N T_{cycle}} \sum_{k=k_0+1}^{k_0+NT_{cycle}} y(k) \cos(\omega_i kh), \quad (9)$$

$$\hat{\alpha}_{ui} = \alpha_{ui}(N) = \frac{2}{\rho_i N T_{cycle}} \sum_{k=k_0+1}^{k_0+NT_{cycle}} u(k) \sin(\omega_i k h), \quad (10)$$

$$\hat{\beta}_{ui} = \beta_{ui}(N) = \frac{2}{\rho_i N T_{cycle}} \sum_{k=k_0+1}^{k_0+NT_{cycle}} u(k) \cos(\omega_i k h), \quad (11)$$

$$i = \overline{1, 2}, \quad T_{cycle} = \frac{2\pi}{\min(\omega_i)h}, \quad (12)$$

здесь N — число периодов наименьшей частоты испытательного сигнала, которое находится в процессе идентификации.

Идентификатор используется для вычисления оценки параметров объекта с помощью его частотных параметров.

Синтезатор служит для вычисления параметров регулятора с помощью метода внутренней модели (A. Visioli, D. Rivera).

Описанные алгоритмы были реализованы на базе промышленного контроллера WinCon W-8341 и названы «ЧАР–ПИД–1». Для экспериментального исследования ЧАР–ПИД–1 был разработан стенд ФМ-2. Он содержит IBM-совместимый одноплатный промышленный компьютер Athena со встроенными ЦАП и АЦП, имитирующий объект. Имитатор объекта — это программа на языке C++, имитирующая объект с коэффициентами, задаваемыми случайно в соответствии с описанными выше предположениями, а также позволяющая задавать произвольные внешние возмущения. ЧАР–ПИД–1 реализован в виде программы на языке C# (платформа .NET).

Экспериментальные исследования проводились с целью изучить, в частности, зависимость времени адаптации от коэффициента влияния испытательного сигнала и величины запаздывания для различных интенсивностей возмущений, а также функционирование адаптивного регулятора при наличии в системе «паразитных» постоянных времени — таких, что передаточная функция объекта управления имеет вид

$$w_{об}(s) = \frac{K}{(Ts + 1) \prod_{i=1}^m (\tilde{T}_i s + 1)} e^{-\tau s}, \quad \tilde{T}_i < \frac{T}{\chi} \quad (i = \overline{1, m}) \quad (13)$$

В качестве внешнего возмущения $f(t)$ использовались: гармонический сигнал, периодический прямоугольный сигнал («меандр»), случайный процесс.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность адаптивного регулятора ЧАР–ПИД–1 при различных внешних возмущениях.

В третьей главе исследуется и разрабатывается точностной адаптивный регулятор. Экспериментальные исследования с регулятором, вычисляемым по разработанным ранее алгоритмам, показали высокий уровень шумов в сигнале управления, что приводит к увеличению длительности и погрешности идентификации объекта. В результате исследований было обнаружено, что такие шумы (помехи) вызваны наличием цифро-аналогового (ЦАП) и аналого-цифрового (АЦП) преобразователей в замкнутом контуре управления. Цель состояла в разработке новых алгоритмов синтеза регулятора, обеспечивающих подавление таких шумов и более надёжную работу адаптивного регулятора.

Имеется линейный нестационарный дискретный объект без запаздывания с неопределённым внешним возмущением вида

$$\begin{aligned} y(k) + d_1^{[m]}y(k-1) + \dots + d_{n-1}^{[m]}y(k-n+1) + d_n^{[m]}y(k-n) = \\ = k_1^{[m]}u(k-1) + \dots + k_{n-1}^{[m]}u(k-n+1) + k_n^{[m]}u(k-n) + f(k), \\ k = 0, 1, 2, \dots, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (14) \end{aligned}$$

где $y(k)$ — выход объекта, измеряемый в момент времени $t = kh$ (h — интервал дискретности объекта); $u(k)$ — управление; $f(k)$ — неизмеряемое внешнее возмущение, являющееся неизвестной ограниченной функцией ($|f(k)| \leq f^*$, где f^* — известная); m — номер режима работы объекта, n — известное число. Коэффициенты объекта $d_j^{[m]}$ и $k_j^{[m]}$ — это неизвестные числа, которые изменяются в моменты времени $t_{об}^{[m]}$ и постоянны на интервалах времени

$[t_{об}^{[m]}, t_{об}^{[m+1]})$, $m = 1, 2, 3, \dots$, $t_{об}^{[1]} = 0$. Моменты времени $t_{об}^{[m]}$, $m = 2, 3, 4, \dots$ известны либо находятся в процессе адаптации. Объект асимптотически устойчив в первом режиме работы.

Управление формируется регулятором

$$\begin{aligned} u(k) + g_1^{[m]}u(k-1) + \dots + g_{\psi-1}^{[m]}u(k-\psi+1) + g_{\psi}^{[m]}u(k-\psi) = \\ = r_0^{[m]}y_v(k-\psi+n-1) + r_1^{[m]}y_v(k-\psi+n-2) + \dots + r_{n-1}^{[m]}y_v(k-\psi), \end{aligned} \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

где $y_v(k) \triangleq y(k) - v(k)$, $v(k)$ — испытательный сигнал, $r^{[m]} = [r_0^{[m]}, \dots, r_{n-1}^{[m]}]$, $g^{[m]} = [g_1^{[m]}, \dots, g_{\psi}^{[m]}]$ — коэффициенты регулятора, $\psi \geq n-1$ — заданное число. Коэффициенты $r^{[m]}$, $g^{[m]}$ находятся к моменту времени $t_{об}^{[m]} + \Delta t_{адап}^{[m]}$, где $t_{об}^{[m]}$ — момент начала m -го режима работы объекта, $\Delta t_{адап}^{[m]}$ — длительность адаптации на режиме m . На первом режиме (при $m = 1$) параметры объекта неизвестны, в качестве сигнала управления подаётся испытательный сигнал $u(k) = v(k)$. На последующих режимах на интервалах времени $[t_{об}^{[m]}, t_{об}^{[m]} + \Delta t_{адап}^{[m]})$ работает регулятор (15) с коэффициентами $r^{[m-1]}$, $g^{[m-1]}$.

Задача состоит в том, чтобы для каждого $m = 1, 2, 3, \dots$ найти коэффициенты регулятора $r^{[m]}$, $g^{[m]}$ так, что регулятор (15) обеспечивал бы выполнение требования к точности

$$|y(k)| \leq y^*, \quad k > k_{\star}^{[m]}, \quad (16)$$

где y^* — заданное число, $k_{\star}^{[m]}$ таково, что момент времени $t_{\star} = k_{\star}^{[m]}h$ лежит внутри интервала времени $t_{об}^{[m]} < t < t_{об}^{[m+1]}$, $m = 1, 2, 3, \dots$. При этом предполагается следующее: существует число $k_{\star}^{[m]}$, удовлетворяющее (16); существует регулятор (15), обеспечивающий достижение цели (16), когда коэффициенты объекта (14) известны; объект удовлетворяет условию смежной устойчивости, но если не изменять регулятор, то при переходе на некоторый режим система потеряет устойчивость.

Структурная схема регулятора имеет вид, показанный на рис. 1, где в алгоритмах (4), (7)–(11) индекс i изменяется от 1 до n .

Идентификатор решает частотные уравнения

$$\hat{k}(e^{-j\omega_i h}) - (\hat{\alpha}_i + j\hat{\beta}_i)\hat{d}(e^{-j\omega_i h}) = 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$\hat{k}(q) = \hat{k}_1 q + \dots + \hat{k}_{n-1} q^{n-1} + \hat{k}_n q^n, \quad \hat{d}(q) = 1 + \hat{d}_1 q + \dots + \hat{d}_{n-1} q^{n-1} + \hat{d}_n q^n -$$

оценки полиномов объекта $k(q) = k_1 q + \dots + k_{n-1} q^{n-1} + k_n q^n,$
 $d(q) = 1 + d_1 q + \dots + d_{n-1} q^{n-1} + d_n q^n.$

Синтезатор решает задачу LQ -оптимизации. При этом объект (14), записанный в пространстве состояний, имеет вид

$$\begin{cases} x(k) = Ax(k-1) + bu(k-1), \\ y(k) = cx(k), \end{cases} \quad (17)$$

где $x(k)$ — n -мерный вектор состояния объекта, A — матрица размером $n \times n$, b — n -мерный вектор чисел, c — строка чисел.

Функционал оптимизации имеет вид

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ x^T(k)Qx(k) + x_{n+1}^2(k) + \right. \\ \left. + \varepsilon_1^2 [x_{n+2}(k)]^2 + \varepsilon_2^2 [x_{n+3}(k)]^2 + \dots + \varepsilon_{\psi-1}^2 [x_{n+\psi}(k)]^2 + \varepsilon_{\psi}^2 [\mu(k)]^2 \right\}, \quad (18)$$

где $x(k)$ — вектор состояния объекта (17), $Q = c^T \tilde{q}^2 c$, $\tilde{q} = \frac{f^*}{y^*}$,

$$x_{n+1}(k) \triangleq u(k), \quad x_{n+2}(k) \triangleq \frac{x_{n+1}(k+1) - x_{n+1}(k)}{h},$$

$$x_{n+3}(k) \triangleq \frac{x_{n+2}(k+1) - x_{n+2}(k)}{h}, \quad \dots, \quad x_{n+\psi}(k) \triangleq \frac{x_{n+\psi-1}(k+1) - x_{n+\psi-1}(k)}{h},$$

$$\mu(k) \triangleq \frac{x_{n+\psi}(k+1) - x_{n+\psi}(k)}{h}, \quad \varepsilon_i^2 = \frac{C_{\psi}^i}{5^{2i} \omega_{cp}^{2i}} \quad (i = \overline{1, \psi}) - \text{достаточно малые ко-}$$

эффициенты, которые зависят от частоты среза системы ω_{cp} , где C_{ψ}^i — число сочетаний из ψ по i , число $\psi \geq n - 1$ определяется из условия реализуемости

передаточной функции регулятора. Отметим, что при $h \rightarrow 0$ выполняется $x_{n+2} \rightarrow \dot{u}, x_{n+3} \rightarrow \ddot{u}, \dots$. Синтезатор находит коэффициенты регулятора так, чтобы выполнялись требования к точности регулирования (16).

Для борьбы с зашумлением в сигнале управления применяется следующий прием. Суть идеи состоит в увеличении порядка знаменателя передаточной функции регулятора (15), т.е. во введении фильтра таких помех (шумов). Реализуется это следующим образом: в функционале качества (18) порядок знаменателя регулятора определяется параметром $\psi = n - 1$. Добавив к этому значению γ , получаем увеличение порядка знаменателя регулятора: $\psi = n - 1 + \gamma$. В работе исследуется, как зависит передаточная функция регулятора от числа γ . Для получения регулятора по выходу используется наблюдатель, построенный прямым методом восстановления.

Описанные алгоритмы были реализованы на базе промышленного контроллера WinCon W-8341 и названы «ЧАР–25». Для экспериментального исследования ЧАР–25 использовался стенд ФМ-2.

При разработке программного обеспечения используется теория конечных автоматов для задания логики работы программы как адаптивного регулятора. Программа использует два конечных автомата КА1 и КА2. Конечный автомат КА2 отображает наиболее крупные блоки состояния программы как адаптивного регулятора, такие как конфигурирование адаптивного регулятора, самонастройка испытательного сигнала, идентификация, регулирование. Состояния автомата КА2 показаны на рис. 2.

В работе численно исследуются эффекты, возникающие при учёте наличия квантования по уровню в ЦАП и АЦП (с использованием системы MATLAB).

Численный эксперимент 1 Непрерывный аналог модели объекта имеет вид

$$w_o(s) = \frac{0.4s + 1}{0.2s^3 + 1.24s^2 + 5.24s + 1}. \quad (19)$$

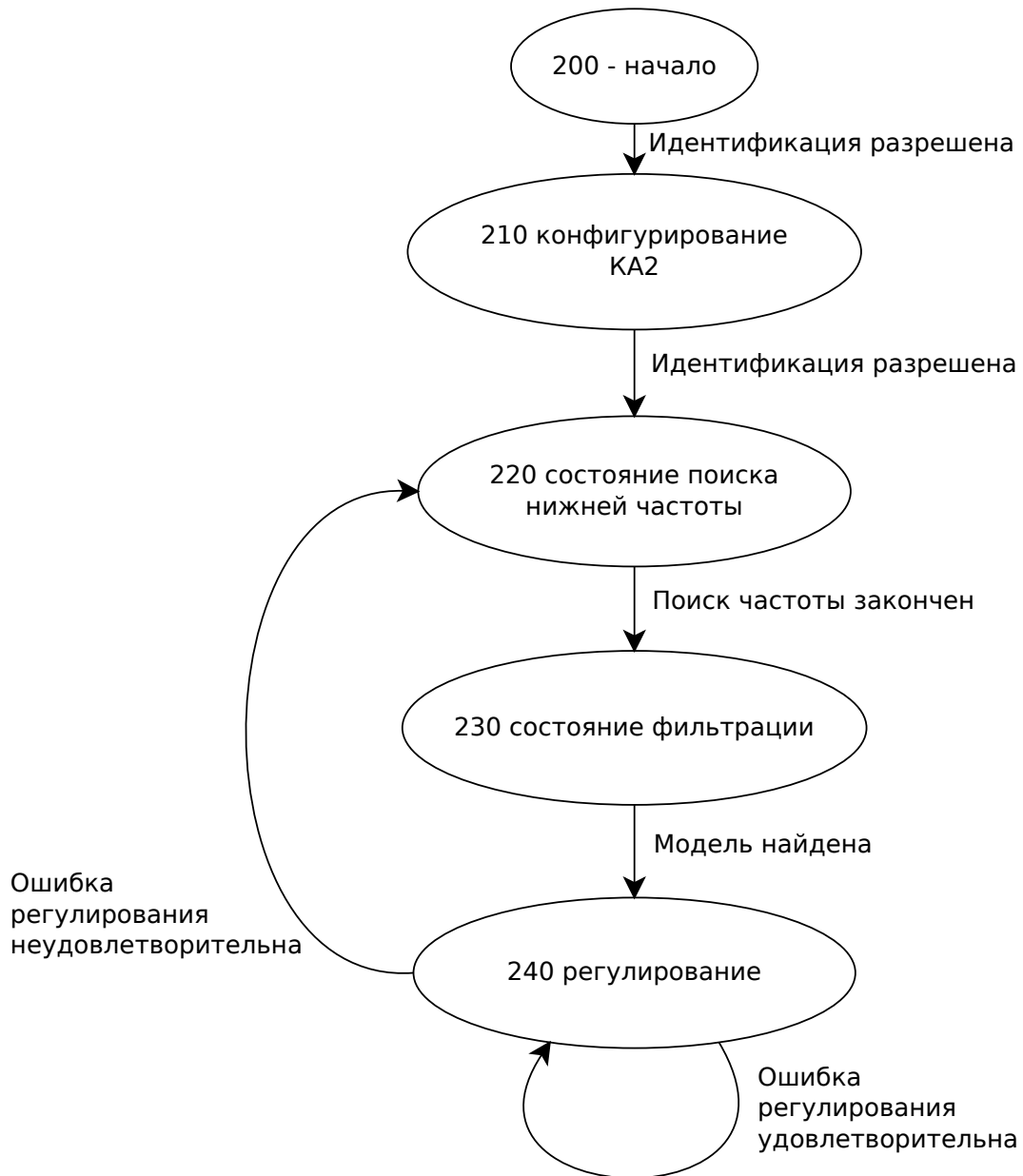


Рис. 2. Конечный автомат 2

Регулятор, построенный при $\psi = n - 1$, описывается передаточной функцией

$$w_p(z) = \frac{-80.37z^2 + 154.4z - 74.24}{z^2 - 1.655z + 0.6741}. \quad (20)$$

На замкнутую систему подаётся испытательный сигнал

$$v(t) = 0.05 \sin(0.2t), \quad (21)$$

внешнее возмущение $f(t) = 0$.

На рис. 3 показано влияние эффекта квантования по уровню на работу

замкнутой системы. На рис. 3а показан выход объекта, а на рис. 3б — сигнал управления. Сигналы $y(t)$, $u(t)$ без учета квантования по уровню показаны чёрной прерывистой линией, а с учётом квантования ЦАП, АЦП — серой сплошной линией. Из рисунка следует, что сигнал управления вследствие наличия квантования по уровню в замкнутой системе сильно зашумлен, что приводит к неточной идентификации объекта в замкнутой системе.

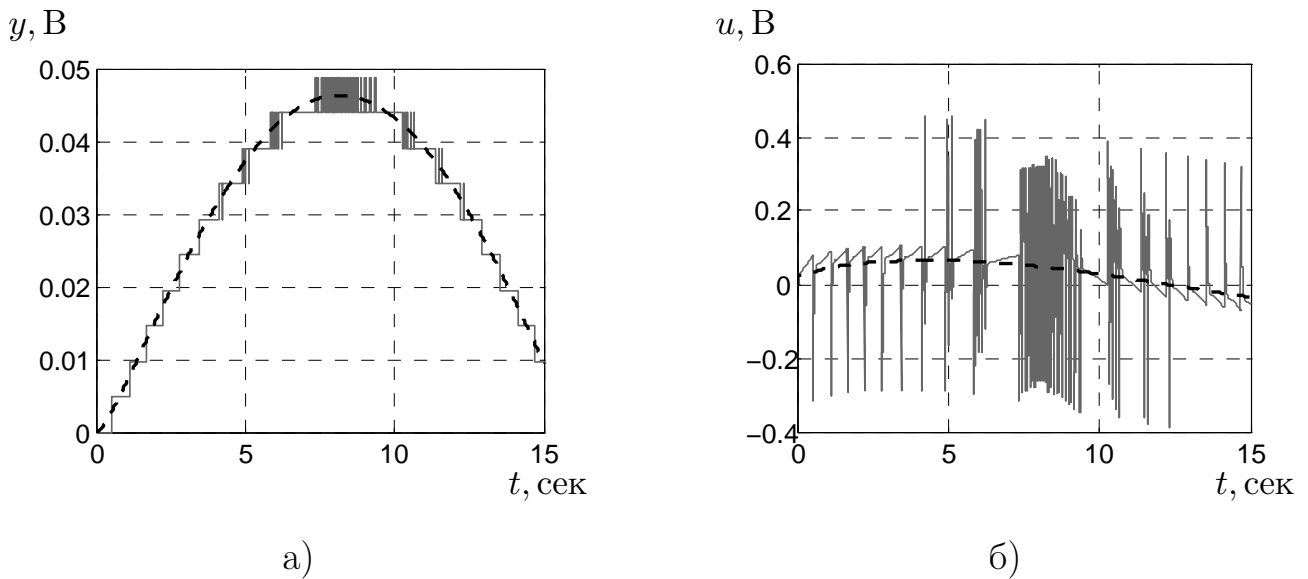


Рис. 3. Результаты численного эксперимента 1 с регулятором (20)

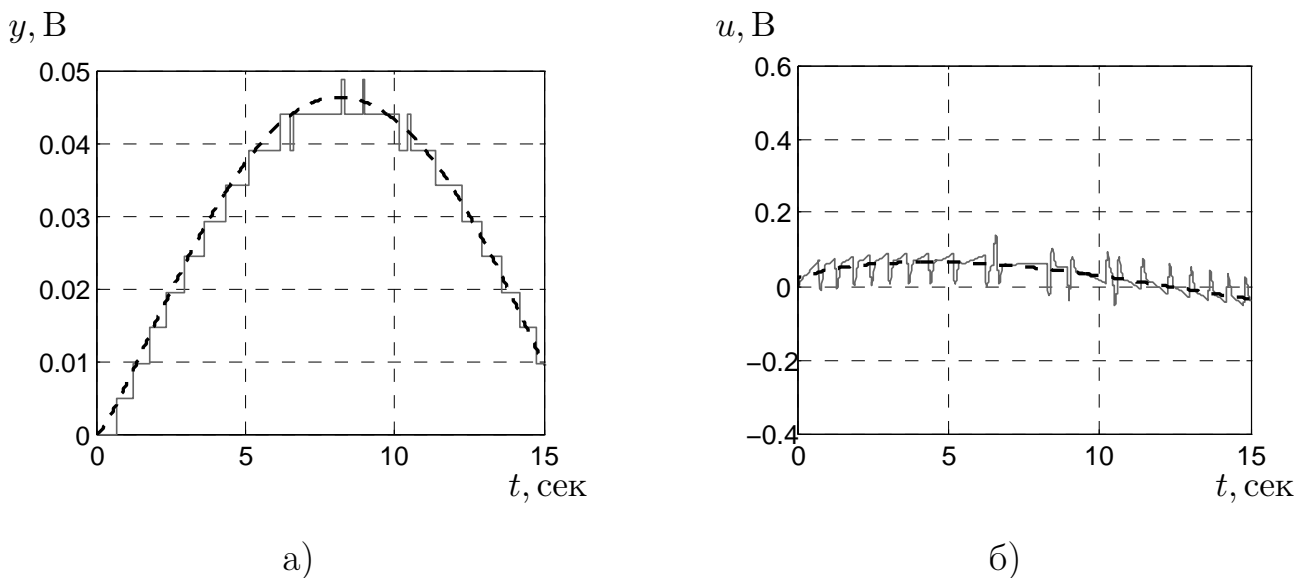


Рис. 4. Результаты численного эксперимента с предложенным регулятором (22).

Численный эксперимент 2 показывает результат увеличения поряд-

ка знаменателя регулятора при $\gamma = 2$. Непрерывный аналог объекта имеет вид (19). Регулятор с увеличенным порядком знаменателя описывается передаточной функцией

$$w_{\text{рег}} = \frac{-2.532z^2 + 4.882z - 2.357}{z^4 - 3.318z^3 + 4.132z^2 - 2.288z + 0.4752}. \quad (22)$$

В качестве испытательного сигнала подаётся функция (21), $f(t) = 0$.

На рис. 4а показан выход объекта $y(t)$, на рис. 4б – сигнал управления $u(t)$ с учётом эффекта квантования по уровню (результат моделирования с регулятором (22)); сигналы $y(t)$, $u(t)$ без учета квантования по уровню показаны чёрной прерывистой линией, а с учётом квантования ЦАП, АЦП – серой сплошной линией. Из рисунков следует, что предложенный подход к синтезу регулятора с увеличением порядка знаменателя его передаточной функции позволяет эффективно уменьшить выбросы, вызванные эффектом квантования по уровню в ЦАП и АЦП; данный результат был подтверждён экспериментальными исследованиями.

В четвёртой главе приводится описание ПИД/И-регулятора, используемого в установке по производству сверхтвёрдых материалов ДО138Б (г. Троицк).

Ставится задача построения алгоритма настройки ПИД-регулятора, управляющего технологическим процессом синтеза материала. Образец, из которого изготавливается сверхтвёрдый материал, представляет собой так называемую сборку, состоящую из собственно рабочего материала (графит) и обрамляющую его керамическую оправку, служащую для удержания материала. Процесс производства состоит в одновременном создании давления и температурного воздействия на рабочий материал путём пропускания электрического тока. Величина подаваемого тока регулируется с помощью ПИД-регулятора. Мощность, выделяемая на образце, измеряется с помощью датчика тока в цепи и датчика падения напряжения на образце. Коэффициенты ПИД-регулятора нуждаются в настройке, поскольку каждый тип сборки об-

ладает различной динамикой.

Для определения модели и динамических характеристик процесса была проведена серия испытаний в разомкнутой системе. В результате их анализа было выяснено, что процесс с достаточной степенью точности можно описать моделью первого порядка с запаздыванием, у которой коэффициент пропорциональности нелинейно зависит от управляющего сигнала

$$W_{\text{ДО1}}(s) = \frac{K_p(u)}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (23)$$

где K_p — пропорциональный коэффициент, u — сигнал управления, T — постоянная времени, зависящая от типа сборок, τ — запаздывание; в качестве альтернативного варианта описания процесса рассматривается модель второго порядка с нелинейным коэффициентом пропорциональности вида

$$W_{\text{ДО2}}(s) = \frac{K_p(u) \cdot (T_u s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (24)$$

Для определения нелинейности $K_p(u)$ строится таблица, ставящая в соответствие величину напряжения u , подаваемую с регулятора, и мощность P , выделяемую на образце, отнесённую к напряжению u .

С достаточной степенью точности зависимость $K_p(u)$ описывается квадратичной функцией $K_p(u) = 276.2u^2 + 19.17u + 45.7$.

Для идентификации выбран динамический алгоритм конечно-частотной идентификации, поскольку внешние возмущения, действующие на объект, малы. Это позволяет значительно сократить время идентификации и провести идентификацию на начальном участке циклограммы (разогрев образца), мало влияющем на качество получаемого сверхтвёрдого материала. На время идентификации на объект подаётся испытательный сигнал, имеющий вид, аналогичный (4). В качестве рабочей выбрана модель объекта (23). Коэффициенты линейной дискретной модели находятся из выражения

$$\theta(N) = M^{-1}v, \quad (25)$$

где θ — вектор параметров объекта, $N = 1, 2, 3, \dots$ — номер такта идентификации, матрица M и вектор v составлены на основе измерений выхода $y(t)$, управления $u(t)$ и испытательного сигнала $v(t)$.

Циклограмма производства материала состоит из трёх фаз. Первая фаза — разогрев, выход на рабочую мощность, мало влияет на качество получаемого материала. Вторая — рабочая фаза, в которой формируется сверхтвёрдый материал. Третья — заключительная, на которой снимается подводимая мощность и остужается образец. Поскольку первая фаза позволяет в широких пределах отклоняться от программного движения, именно на этой фазе происходит этап идентификации.

Идентификация происходит в замкнутой системе с И-регулятором. Такой регулятор, во-первых, гарантирует устойчивость системы на множестве параметров объекта; во-вторых, плавно отслеживает программное движение.

Коэффициент k_i для И-регулятора находится из условия обеспечения устойчивости при заданных интервалах коэффициентов модели объекта. Из многочисленных экспериментов были получены граничные значения коэффициентов модели (23): $\underline{T} = 0.02$, $\bar{T} = 0.5$, $\underline{\tau} = \bar{\tau} = 0.06$, $\underline{k_p} = 103.5$, $\bar{k_p} = 2764$.

Расчёт дискретного ПИД-регулятора производится по методу внутренней модели, в соответствии с которым модель (23) линеаризуется в рабочей точке, приводится к дискретному виду, а регулятор выбирается так, чтобы замкнутая система была близка к желаемой.

Испытания с описанным ПИД/И регулятором показали его надёжность и хорошее качество процессов регулирования.

Адаптивный регулятор ЧАР-ПИД-2S для объекта второго порядка был реализован для промышленного контроллера Siemens S7-313C. Для автонастройки ПИД-регулятора фирма Siemens предоставляет программное обеспечение PID Self-tuner. Его недостаток состоит в требовании малости внешних возмущений, действующих на объект. В процессе исследований было выясне-

но, что внешние возмущения могут привести к неустойчивости в системе с таким алгоритмом настройки.

На рис. 5 показан график процесса настройки по алгоритму Siemens при внешнем возмущении, не позволяющем правильно определить точку перегиба. После настройки система становится неустойчивой. На рис. 6 показан график самонастройки с регулятором ЧАР–ПИД–2S при том же возмущении, действующем на объект. После настройки система устойчива, и выход $y(t)$ приводится к уставке y_{sp} (1 В).

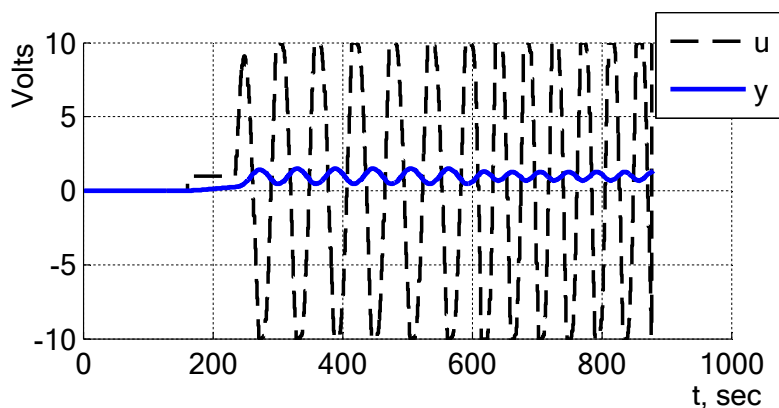


Рис. 5. Сигналы $y(t)$, $u(t)$ с регулятором Siemens PID Self-tuner

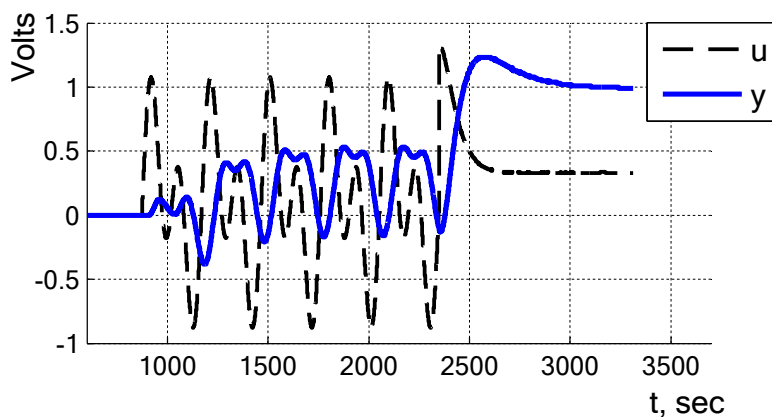


Рис. 6. Сигналы $y(t)$, $u(t)$ с регулятором ЧАР–ПИД–2S

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Разработаны алгоритмы частотного адаптивного ПИД-регулятора, обеспечивающие процесс адаптации в условиях интенсивных внешних возмущений. Эти алгоритмы реализованы в регуляторе ЧАР-ПИД-1 для промышленного контроллера WinCon W-8341. Экспериментальные исследования этого регулятора подтвердили его эффективность.
2. По известным ранее алгоритмам точностного адаптивного регулятора разработан адаптивный регулятор для промышленного контроллера WinCon W-8431. Проведены экспериментальные исследования и установлено влияние ЦАП и АЦП на точность идентификации.
3. Предложен алгоритм адаптивного управления с учётом ЦАП и АЦП. Он основан на изменении структуры наблюдателя и функционала оптимизации, отличающегося от известного наличием большего числа членов, имеющих аналог старших производных по управлению. Разработана теория наблюдателя для точностного адаптивного регулятора.
4. На основе разработанной теории реализован точностной адаптивный регулятор ЧАР-25 для промышленного контроллера WinCon W-8341. Проведены его экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность предложенных алгоритмов.
5. Частотный адаптивный регулятор внедрён в установку по производству сверхтвёрдых материалов.

Основные публикации по теме диссертации

1. Резков, И. Г. Адаптивный регулятор для многорежимного объекта / И. Г. Резков // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 5. — С. 35–58.

2. Александров, А. Г. Адаптивный ПИД-регулятор – ЧАР-ПИД-1 / А. Г. Александров, М. В. Паленов, И. Г. Резков // Автоматизация в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 58–61.
3. Резков, И. Г., Александров, А. Г. Адаптивный регулятор ЧАР-25 для Контроллера WinCon: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614329 РФ; Зарег. 29.04.2013.
4. Резков, И. Г. Синтез точностного регулятора для объекта третьего порядка в составе адаптивного управления / И. Г. Резков // Управление большими системами: материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. / Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. — Т. 1. — Уфа : УГАТУ, 2013. — С. 86–89. — ISBN 978-5-4221-0447-5.
5. Резков, И. Г. Адаптивный регулятор / И. Г. Резков, М. В. Паленов // Материалы докладов XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». — Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2010. — С. 203–209.
6. Резков, И. Г. Частотный адаптивный пид-регулятор: экспериментальные исследования / И. Г. Резков // Труды Первой традиционной всероссийской молодежной летней школы “Управление, информация и оптимизация”. — М. : ИПУ РАН, 2009. — С. 140–146. — ISBN 978-5-91450-049-5.
7. Паленов, М. В. Частотный адаптивный ПИД-регулятор. / М. В. Паленов, И. Г. Резков, А. С. Фёдоров // Проблемы управления, передачи и обработки информации — АТМ-ТКИ-50: сб. трудов Международ. науч. конф. / Под ред. А.Г. Александрова и М.Ф. Степанова. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. — С. 97–101. — ISBN 978-5-7433-2107-0.
8. Александров, А. Г. Частотный адаптивный ПИД-регулятор: ЧАР-ПИД-W1 / А. Г. Александров, М. В. Паленов, И. Г. Резков // Материалы

- 33 Международного семинара-презентации и выставки. — Москва : ИПУ РАН, 2009. — Июнь. — С. 68–76. — CD-ROM ISBN-978-5-91450-029-7.
9. Александров, А. Г. Алгоритм частотного адаптивного ПИД-регулятора. / А. Г. Александров, М. В. Паленов, И. Г. Резков // Материалы 3-й Научной конференции по автоматизации в промышленности. — Москва : ИПУ РАН, 2009. — Июнь. — С. 49–58. — CD-ROM ISBN-978-5-91450-030-3.
10. Резков, И. Г. Частотно-адаптивный регулятор: синтез регулятора / И. Г. Резков // Труды второй Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-10). — М. : ИПУ РАН, 2010. — С. 976–987.
11. Александров, А. Г. Адаптивный регулятор двумерного объекта: экспериментальные исследования / А. Г. Александров, И. Г. Резков, Д. В. Шатов // Сборник трудов II Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации АТМ-2011». — Саратов : ООО «Издательство „Научная книга“», 2011. — октябрь. — С. 16–21.
12. Александров, А. Г. Адаптивный регулятор для процесса синтеза сверхтвердых материалов / А. Г. Александров, М. В. Паленов, И. Г. Резков // Тезисы докладов международной научно-практической конференции ”Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на Российских предприятиях“. — М. : ИПУ РАН, 2011.
13. Резков, И. Г. Реализация частотного адаптивного регулятора на контроллере SIEMENS S7-313C / И. Г. Резков // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. / под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. — Т. 1. — Саратов : Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. — С. 55–57.

14. Резков, И. Г. Адаптивный регулятор для многорежимного объекта / И. Г. Резков // Управление, информация и оптимизация: материалы Всероссийской научной школы. — Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2011. — С. 228–229. — ISBN 978-5-904786-96-0.

Научное издание

РЕЗКОВ Илья Геннадьевич

**Адаптивные регуляторы с конечно-частотной
идентификацией**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать от 29.07.2014

Формат 29.7 × 42/4.

Усл.-печ. л. 1,61. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100. Заказ 100.

117997, Москва, Профсоюзная, 65
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук

