



АДАПТИВНЫЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР – ЧАР-ПИД-1

А.Г. Александров, М.В. Паленов, И.Г. Резков (ИПУ РАН)

Предлагается частотный адаптивный ПИД-регулятор, получивший название ЧАР-ПИД-1. В основе его работы лежит метод частотной идентификации, использующий испытательный гармонический сигнал, подаваемый на вход замкнутой системы. В отличие от существующих адаптивных ПИД-регуляторов амплитуды и частоты гармоник испытательного сигнала самонастраиваются с целью обеспечения минимально допустимого искажения выхода системы, вызванного испытательным сигналом. Предлагается алгоритм автоматического определения окончания идентификации, обеспечивающий заданную точность получаемых оценок параметров модели объекта управления, вне зависимости от уровня внешних возмущений.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, адаптация, частотная идентификация, интенсивные внешние возмущения.

Современные системы автоматического управления (САУ), применяемые для управления ТП, используют ПИ- или ПИД-регуляторы, что вызвано их простотой реализации и эффективностью. Однако стандартно применяемые законы ПИ- или ПИД-регулирования не позволяют обеспечить качество регулирования, удовлетворяющее многим современным требованиям, так как значительное число объектов управления (ОУ) обладает нестационарными (дрейфующими) во времени параметрами. Дрейф параметров, как правило, вызывается рядом факторов:

- изменением нагрузки на технологический агрегат, связанное с рыночным спросом на производимый продукт;
- изменением состава или качества сырья, используемого в ТП;
- старением оборудования (например, увеличением накипи в теплообменниках, прогоранием футеровки печей и т.д.)
- влиянием окружающей температуры и влажности, связанным со сменой времен года;
- реконструкцией или заменой части оборудования, входящего в технологический комплекс и т.д.

Такие ОУ требуют использования адаптивных регуляторов, позволяющих осуществлять непрерывную или периодическую подстройку параметров ПИД-регулятора под изменяющиеся характеристики ОУ. Отследить изменение характеристик ОУ можно посредством идентификации модели ОУ, которая может осуществляться непрерывно или периодически. На основе идентифицированных оценок параметров модели ОУ корректируются параметры ПИД-регулятора. Таким образом, обеспечивается постоянная оптимальная настройка ПИД-регулятора с точки зрения выбранного критерия.

Современные адаптивные ПИД-регуляторы используют различные методы идентификации, рассчитанные на различный уровень внешних возмущений, воздействующих на ОУ, и уровень помех измерения. Методы идентификации, основанные на анали-

зе переходной характеристики замкнутой системы (ОУ замкнут ПИД-регулятором), как правило, применяют в случаях, когда переходная характеристика замкнутой системы, вызванная ступенчатым изменением задающего воздействия (уставки), легко различима на фоне внешних возмущений. По результатам идентификации подстраивают параметры ПИД-регулятора [1, 2, 3]. При необходимости повторной подстройки параметров ПИД-регулятора эксперимент повторяют. В тех случаях, когда уровень внешних возмущений такой, что выделить переходную характеристику невозможно, применяют частотный метод идентификации [4, 5, 6], использующий испытательный сигнал в виде моногармонического воздействия (в сигнале содержится одна гармоника). С помощью этого метода оценивают значения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик на заданной частоте. На основе полученных оценок корректируются параметры ПИД-регулятора.

В ситуациях, когда требуется повысить качество регулирования, используют методы настройки ПИД-регуляторов, использующие больше информации об ОУ (используются более сложные модели динамики ОУ). Получить больше информации об ОУ в условиях, когда переходная характеристика не различима на фоне внешнего возмущения, можно используя частотный метод идентификации с полигармоническим испытательным сигналом (в сигнале содержится две или более гармоник). Предлагаемый адаптивный ПИД-регулятор (ЧАР-ПИД-1) использует частотный метод идентификации с двух гармоничным испытательным сигналом (в сигнале содержится две гармоники), основанный на предложенных в [7] алгоритмах, и ориентирован на работу в таких условиях, когда переходные характеристики системы, вызванные относительно малыми изменениями задающего воздействия, неразличимы на фоне внешних возмущений.

Структурная схема регулятора ЧАР-ПИД-1 представлена на рис. 1, где $y_{sp}(kh)$ – задающее воздействие, $y(kh)$ – выход ОУ, $u(kh)$ – управляющий сигнал,

*Разумный человек
приспосабливается к миру;
неразумный -
упорно пытается приспособить
мир к себе. Поэтому прогресс
зависит от неразумных людей.*

Джордж Бернард Шоу

$v(kh)$ – испытательный сигнал, $\varepsilon(kh)$ – ошибка слежения, $f(kh)$ – неизвестное внешнее возмущение.

Предполагается, что динамика ОУ описывается передаточной функцией:

$$W_{об}(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления, T – постоянная времени, τ – запаздывание. Все эти переменные являются неизвестными и медленно изменяются во времени.

ЧАР-ПИД-1 функционирует следующим образом. По мере необходимости оператор запускается адаптация ПИД-регулятора, которая протекает в два этапа.

На первом этапе происходит настройка испытательного сигнала, формируемого генератором испытательного сигнала (ГИС) и подаваемого на вход системы управления:

$$v(kh) = \rho_1 \sin \omega_1 kh + \rho_2 \sin \omega_2 kh, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 – амплитуды, ω_1 и ω_2 – частоты гармоник испытательного сигнала, определяемые *вычислительным блоком* (ВБ). Частоты ω_1 и ω_2 вычисляются на основе оценок \hat{K} , \hat{T} , $\hat{\tau}$ параметров модели ОУ. Для настройки амплитуд ρ_1 и ρ_2 *вычислителем коэффициента влияния испытательного сигнала* (ВКИС) определяется среднеквадратичное отклонение ошибки слежения при отключенном испытательном сигнале ($v(kh) = 0$):

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_{sp}(kh) - \bar{y}(kh)]^2,$$

где $\bar{y}(kh)$ – естественный выход ОУ при отсутствии испытательного сигнала.

Среднеквадратичное отклонение ошибки слежения при испытательном сигнале:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_{sp}(kh) - y(kh)]^2.$$

Значения $\bar{\sigma}^2$ и σ^2 отображаются на экране оператора. Выходом ВКИС является отношение среднеквадратичных отклонений, называемое коэффициентом влияния испытательного сигнала:

$$K_v = \frac{\sigma^2}{\bar{\sigma}^2}. \quad (3)$$

Уровень испытательного сигнала ограничивается желаемым коэффициентом влияния испытательного сигнала – K_v^* , величина которого задается оператором. Чем больше оператор может позволить "испортить" выход системы испытательным сигналом, тем

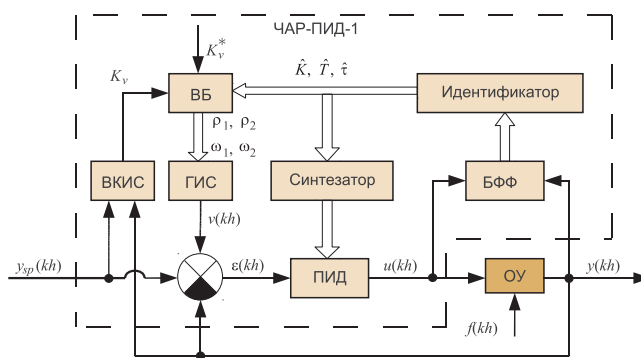


Рис. 1. Структурная схема системы с адаптивным ПИД-регулятором ЧАР ПИД-1

больше значение K_v^* ($K_v^* > 1$). На основе заданного допустимого коэффициента влияния испытательного сигнала K_v^* , а также текущего значения коэффициента влияния испытательного сигнала K_v , *вычислительный блок* (ВБ) определяет амплитуды ρ_1 и ρ_2 гармоник испытательного сигнала таким, что полученное значение K_v будет чуть меньше или равно заданному K_v^* . После этого настройка испытательного сигнала завершается.

На втором этапе осуществляется идентификация оценок параметров ОУ, при этом амплитуды и частоты испытательного сигнала не изменяются в ходе всего процесса. *Блок фильтра Фурье* (БФФ) осуществляет оценку амплитудно-фазо-частотной характеристики ОУ на частотах ω_1 и ω_2 . *Идентификатор* по полученным оценкам амплитудно-фазо-частотной характеристики ОУ вычисляет оценки параметров модели ОУ (1) – \hat{K} , \hat{T} , $\hat{\tau}$. На основе этих оценок *синтезатор* находит новые параметры ПИД-регулятора. Адаптация завершается автоматически по достижении необходимой относительной точности оценок параметров модели ОУ.

При изменении параметров объекта указанные этапы повторяются.

Результаты экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований адаптивного ПИД-регулятора ЧАР-ПИД-1 был разработан стенд полунатурных испытаний ФМ-2, включающий промышленный контроллер WinCon W-8341 и промышленный компьютер Athena, которые взаимодействуют между собой посредством встроенных аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей. Имитатор объекта управления выполнен на промышленном компьютере Athena и представляет собой программу на языке С, функционирующую под ОС MS-DOS. Такое выполнение позволяет добиться высокой гибкости, что позволяет легко изменять структуру ОУ и проводить эксперименты при различных параметрах внешнего возмущения. ЧАР-ПИД-1 реализован на промышленном контроллере WinCon W-8341.

При испытаниях динамика модели ОУ имела аналогичный (1) вид:

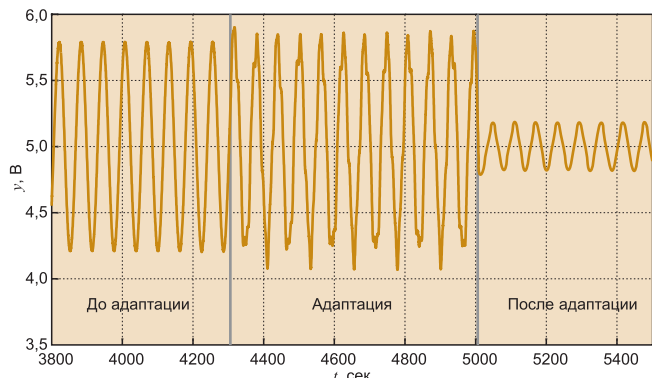


Рис. 2. Результаты работы ЧАР-ПИД-1 при внешнем возмущении $f(t) = \sin(0,1t)$

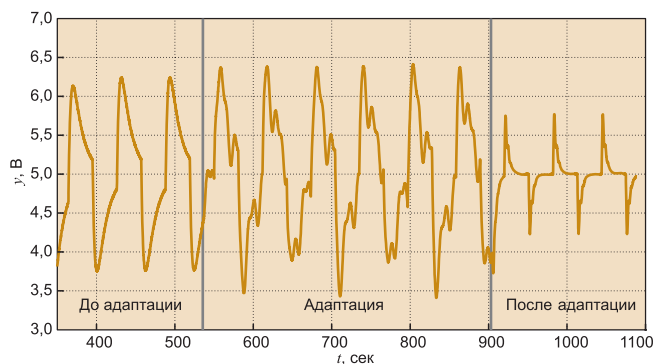


Рис. 3. Результаты работы ЧАР-ПИД-1 при внешнем возмущении $f(t) = \text{sign}[\sin(0,1t)]$

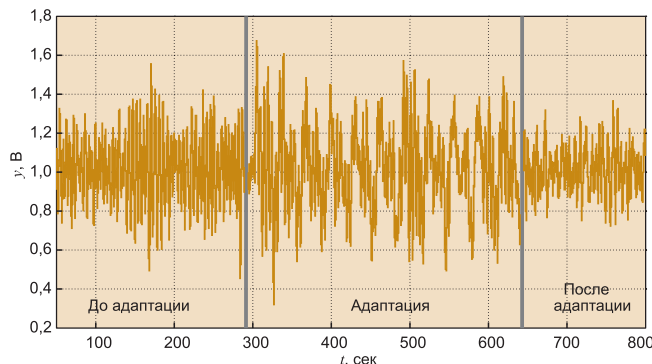


Рис. 4. Результаты работы ЧАР-ПИД-1 при внешнем возмущении $f(t) = 3 \cdot \text{rand}$

В экспериментах имитатор ОУ реализовывал передаточную функцию вида:

$$W_{об}(s) = \frac{1e^{-1,2s}}{(2,8s + 1)(0,5s + 1)(0,1s + 1)}. \quad (5)$$

Первый эксперимент. Внешнее возмущение, воздействующее на ОУ, имеет вид $f(t) = \sin(0,1t)$. ОУ замкнут с адаптивным регулятором ЧАР-ПИД-1. Коэффициент влияния испытательного сигнала не превосходит $K_v^* = 1,2$. Задающее воздействие постоянно $u_{sp} = 5$ В. Выход ОУ, замкнутого с ЧАР-ПИД-1, приведен на рис. 2. Здесь первой вертикальной линией обозначен момент начала адаптации, а второй – момент ее окончания.

Второй эксперимент. Внешнее возмущение, воздействующее на ОУ, имеет вид $f(t) = \text{sign}[\sin(0,1t)]$. ОУ замкнут с адаптивным регулятором ЧАР-ПИД-1. Коэффициент влияния испытательного сигнала не превосходит $K_v^* = 1,2$. Задающее воздействие постоянно $u_{sp} = 5$ В. Выход ОУ, замкнутого с ЧАР-ПИД-1, приведен на рис. 3.

$$W_{об}(s) = \frac{K}{(Ts + 1) \prod_{i=1}^2 (\tilde{T}_i s + 1)} e^{-\tau s},$$

где \tilde{T}_1 и \tilde{T}_2 – неучтенные при синтезе постоянные времени. Предполагается, что \tilde{T}_1 и \tilde{T}_2 меньше основной постоянной времени T объекта управления.

Концерн АББ измерил уровень потребления воды на крупнейшем музыкальном фестивале мира в Глостонбери

Недавно завершился глостонберийский фестиваль современного исполнительского искусства – одно из главных музыкальных событий года Великобритании. Задуманный организаторами как "самое масштабное представление под открытым небом", палаточный городок глостонберийского фестиваля с развлекательным комплексом, двумя сценами, цирком и аттракционами расположился на 4,4 км² земли молочной фермы, в нескольких километрах от г. Глостонбери. Обширная инфраструктура городка позволила его "жителям" чувствовать себя комфортно в течение 5 дней фестиваля, иметь достаточное количество продовольственных запасов, воды, электроэнергии, а также систему канализации. Для обеспечения этих нужд в течение 5 дней фестиваля было израсходовано свыше 11 млн. л воды (более 2 млн. л ежедневно). Вода поставлялась из двух специально установленных подземных резервуаров посредством трубопроводной распределительной сети для канализации, 700 умывальников и 100 питьевых фонтанов.

Контроль за единой системой коммуникаций обеспечивало инновационное оборудование АББ – видеографический самописец SM500F и электромагнитный расходомер WaterMaster. Данное решение позволило организаторам фести-

тиваля осуществить предельно точный мониторинг уровня потребления водных ресурсов на всей территории одновременно. Электромагнитный расходомер WaterMaster измерял расход воды в резервуарах и трубопроводе, далее соотносил количество использованной воды с ее стоимостью и выдавал данные об уровне потребления в любой период времени фестиваля. Непрерывный контроль над уровнем воды в водохранилище позволял заблаговременно прогнозировать подачу воды и обеспечивать дозированное распределение в соответствии с действующей производительностью насоса.

Второй прибор – мультипараметрический видеографический самописец SM3000 – фиксировал показатели электроэнергии, вырабатываемой установленной на фестивале фотоэлектрической станцией. Разместившиеся на территории местного коровника 1116 солнечных панелей генерировали 200 кВт/ч чистой энергии и полностью покрывали потребности фестиваля в энергии.

Данные, полученные с помощью оборудования АББ, позволили быстро и точно произвести учет водопотребления за все дни фестиваля, в результате чего затраты на воду были существенно снижены, поскольку оплата производилась только за объемы фактически использованного ресурса.

[Http://www.abb.ru](http://www.abb.ru)

Здесь первой вертикальной линией обозначен момент начала адаптации, а второй – момент ее окончания.

Третий эксперимент. Внешнее возмущение, воздействующее на ОУ, является случайным процессом $f(t) = 3 \cdot \text{rand}$. ОУ замкнут с адаптивным регулятором ЧАР-ПИД-1. Коэффициент влияния испытательного сигнала не превосходит $K_v^* = 1,1$. Задающее воздействие постоянно $u_{sp} = 1$ В. Выход ОУ, замкнутого с ЧАР-ПИД-1, приведен на рис. 4, где первой вертикальной линией обозначен момент начала адаптации, а второй – момент ее окончания.

Из результатов экспериментов рис. 2, 3, 4. видна эффективность адаптивного регулятора ЧАР-ПИД-1. Вне зависимости от вида внешнего возмущения обеспечивается эффективная настройка ПИД-регулятора, при этом практически незаметно влияние испытательного сигнала на выход системы.

Заключение

Экспериментальные исследования показывают высокую эффективность адаптивного регулятора ЧАР-ПИД-1. Регулятор хорошо адаптируется при различных возмущениях и обеспечивает достижение поставленной цели.

ЧАР-ПИД-1 имеет широкую область применения (нефтегазовая промышленность, энергетика, сталеплавильные процессы и др.) в ситуациях, когда труд-

но применить адаптивные регуляторы, основанные на идентификации переходных характеристик.

Список литературы

1. Шубладзе А.М., Кузнецов С.И. Автоматически настраиваемые промышленные ПИ и ПИД-регуляторы // Автоматизация в промышленности. 2007. №2
2. Ротач В.Я. Кузицин В.Ф. Петров С.В. Настройка регуляторов по переходным характеристикам систем управления без их аппроксимации аналитическими выражениями. // Автоматизация в промышленности. №11. 2009.
3. Takatsu, H., Kawano T. and Kitano Intelligent self-tuning PID controller. // In Preprints IFAC International Symposium on Intelligent Tuning and Adaptive Control (ITAC 91). Singapore. 1991.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического регулятора для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ. 2004.
5. Мазуров В.М., Литюга А.В., Спицын А.В. Развитие технологий адаптивного управления в SCADA системе TRACE MODE // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. 2002. №1.
6. Astrom K.J. and T. Hagglund C.C. Hang and W.K. Ho Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers // A Survey. Control Engineering Practice. 1993. Vol. 1.
7. Александров А.Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием // Тр. IX Междунар. Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением". Т. 3. Управление и оптимизация. Иркутск.

Александров Альберт Георгиевич – д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник,

Паленов Максим Владимирович – ст. инженер,

Резков Илья Геннадьевич – ст. инженер-программист ИПУ РАН.

Контактный телефон (495)334-76-41

E-mail: alex7@ipu.rssi.ru, max_elek@mail.ru, fagoth@mail.ru

Новый контроллер для автоматизации локальных систем ПЛК73 и интерфейсные платы расширения ПИ73

В августе 2011 г. компания ОВЕН объявила о начале продаж нового ПЛК для локальных систем автоматизации в щитовом исполнении. На рынок выпущен контроллер ОВЕН ПЛК73 и набор интерфейсных плат ПИ73 для расширения функциональных возможностей прибора. Новый прибор дополнит существующую линейку контроллеров ОВЕН для автоматизации локальных задач.

Это первый выпущенный компанией контроллер для монтажа непосредственно на лицевую панель щита. На панели контроллера расположены четырехстрочный жидкокристаллический дисплей для отображения данных, кнопки управления и сигнальные светодиоды. Данные конструктивные особенности дают возможность управления ТП непосредственно с самого контроллера без установки дополнительных средств ЧМИ – панелей оператора, кнопок управления и светосигнальной аппаратуры. На дисплее контроллера можно одновременно отображать текущие значения контролируемых параметров и режима ТП. Используя кнопки, можно оперативно управлять режимами ТП и задавать значения поддерживаемых параметров.

Контроллер ПЛК73 разработан на базе высокопроизводительного 32-разрядного RISC-процессора архитектуры

ARM7, работающего с тактовой частотой 50 МГц. Объем оперативной памяти составляет 10 Кбайт. Объем памяти для хранения программ – 280 Кбайт. Объем памяти для Retain-переменных – 448 байт. Программирование контроллера осуществляется в профессиональной, распространенной системе – CoDeSys v.2. Время цикла контроллера, по умолчанию, составляет 1 мс.



Контроллер имеет встроенные входы/выходы: 8 дискретных входов; 8 аналоговых входов (для подключения широкого спектра датчиков ТС, ТП, тока и напряжения); 8 выходов, из которых 4 первых – всегда типа К, остальные выходы могут быть дискретного, или аналогового типа. Для увеличения числа выходных элементов предусмотрено подключение модуля MP1. Для подключения дополнительных устройств (панели оператора, модули ввода/вывода, GSM-модемы) возможно подключение платы расширения ПИ73, для добавления последовательных интерфейсов (RS-232/485).

Контроллеры данной линейки применяются для создания систем автоматизированного управления технологическим оборудованием в различных областях промышленности, жилищно-коммунального и сельского хозяйства.

[Http://www.owen.ru](http://www.owen.ru)