

# СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДАПТИВНЫХ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Александров А.Г., Паленов М.В.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*  
[alex7@ipu.ru](mailto:alex7@ipu.ru), [max\\_elek@mail.ru](mailto:max_elek@mail.ru)

*Аннотация: Приводится сжатый обзор используемых на сегодня форм ПИД-регуляторов, алгоритмов их автоматической настройки и адаптивного управления в технических системах автоматизации. Приводятся некоторые алгоритмы управления, которые, возможно, будут широко использоваться в будущем. Подробно рассмотрен алгоритм, основанный на конечно-частотной идентификации.*

Ключевые слова: ПИД-регулятор, автоматическая настройка, алгоритмы адаптации.

## **Введение**

На сегодняшний день пропорционально-интегро-дифференцирующие (ПИД) регуляторы широко распространены в технических системах и используются порядка в 90-95% регулируемых контуров. Такая популярность вызвана тем, что регулятор позволяет достичь поставленной цели управления для большинства технологических объектов, при этом его структура компактна и проста. За долгую историю своего использования и развития закон ПИД управления дополнен нововведениями, призванными повысить его эффективно, это - реализация дифференцирования, борьба с насыщением интегральной составляющей и упреждающее управление. Однако ключевым вопросом в использовании ПИД-регулятора был вопрос настройки его коэффициентов. Первоначально этот вопрос решался с помощью человека-наладчика, который, используя свои знания и опыт, а так же интуицию, производил настройку ПИД-регулятора, опираясь на методы расчета коэффициентов регулятора, например Циглера-Никольса. Впоследствии, с появлением ЭВМ, а, следовательно, и программируемых логических контроллеров (ПЛК), SCADA систем и распределенных систем управления (РСУ), появились методы автоматической настройки (автонастройки) ПИД-регуляторов, цель которых разовая настройка, или настройка по запросу оператора, регулятора в автоматическом режиме с использованием испытательных воздействий. Как правило, эти испытательные воздействия нарушают нормальный режим работы объекта управления (ОУ). Однако, значительное количество ОУ обладает нестационарными (дрейфующими) во времени параметрами. В связи с этим разово настроенный регулятор не может обеспечить достижение цели управления в процессе всего функционирования ОУ. Таким образом присутствует необходимость постоянно или периодически подстраивать параметры ПИД-регулятора под изменяющиеся параметры ОУ так, чтобы выполнялась цель управления. Решение этой проблемы достигается с помощью адаптивного управления, которое, в зависимости от алгоритма адаптации, подразумевает постоянную или периодическую корректировку коэффициентов ПИД-регулятора. Выделяют прямые и непрямые алгоритмы адаптивного управления. Прямые алгоритмы корректируют коэффициенты ПИД-регулятора на основе анализа регулируемой переменной. Непрямые алгоритмы основываются на идентификации модели ОУ и корректировке на основе ее коэффициентов ПИД-регулятора [5, 18, 21, 22].

## **1. Разновидности ПИД-регуляторов и методы их синтеза**

ПИД-регуляторы широко распространены на сегодняшний день не только в промышленности, но и в других технических отраслях. Большой объем решаемых проблем обусловил возникновение различных форм ПИД-регуляторов, а так же множества методов их синтеза. Уже 60 лет активно ведутся исследования в области ПИД регулирования, было опубликовано

огромное количество статей и отчетов, а так же книг, в которых обоснована необходимость различных методов синтеза и приведены простые правила расчета параметров ПИД-регуляторов. Среди всех книг стоит выделить пособие по настройке ПИ и ПИД регуляторов [1, 2], второе издание которого вышло в 2006 году и собрало 443 метода синтеза, а в 2009 году вышло третье издание данной книги и количество собранных методов уже составило 1731, куда попали, наверное, все методы известные со времен Циглера-Никольса.

Несмотря на простоту понятия ПИД-регулятор, выделяют несколько различных форм реализующих ПИД закон управления. Это связано как с историческими причинами, так и с нововведениями, пришедшими из общей теории управления. Таким образом, ПИД-регуляторы реализованные в различных ПЛК, SCADA системах и РСУ отличаются по своей структуре, что, как правило, указывается в документации.

### 1.1. Структура и формы ПИД-регуляторов

Как уже упоминалось выше, в технических системах используются различные формы ПИД-регуляторов, количество которых больше десяти [2]. Рассмотрим наиболее популярные формы ПИД-регуляторов, используемые в технических системах:

- 1) *Классическая* или *нереализуемая* - наиболее известная и распространенная, передаточная функция которой имеет вид

$$C(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right),$$

$$= k_c + k_I \frac{1}{s} + k_D s$$

где  $s$  – символ преобразования по Лапласу,  $k_c$  - коэффициент усиления регулятора,  $T_I$  - постоянная времени интегрирования,  $T_D$  - постоянная времени дифференцирования.

Эта форма используется в следующих продуктах:

Allen Bradley PLC5 product,  
 Bailey FC19 PID algorithm,  
 Fanuc Series 90–30 and 90–70 Independent Form PID algorithm,  
 Intellution FIX products,  
 Honeywell TDC3000 Process Manager Type A, non-interactive mode product,  
 Leeds and Northrup Electromax 5 product,  
 Yokogawa Field Control Station (FCS) PID algorithm,  
 ОВЕН ПЛК 100, 150, 154, ТРМ10, 101, 148, 210  
 ТЕХНОКОНТ P.I.D. – Expert.

- 2) *Последовательная*, возникшая в результате применения ПИД-регуляторов в системах с пневматическими устройствами. На сегодняшний день итерационная форма используется во множестве коммерческих регуляторов, к примеру фирмы “Foxboro”.

$$C(s) = k_c (\alpha + T_D s) \left( 1 + \frac{1}{\alpha T_I s} \right), \quad T_I \geq 4T_D, \quad \text{где } \alpha = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_D}{T_I}}}{2} > 0.$$

Эта форма, при  $\alpha = 1$ , используется в следующих продуктах:

Turnbull TCS6000 series product,  
 Alfa-Laval Automation ECA400 product,  
 Foxboro EXACT 760/761 product.

Существует убеждение, что параметры ПИД-регулятора в последовательной форме гораздо легче настраивать вручную.

3) *ПИД-регулятор с фильтром.* Классическая и последовательная формы регуляторов содержат чистое дифференцирование, что может вызвать ряд проблем, связанных с реализацией и большим коэффициентом усиления на высоких частотах [5], часто используют дополнительные фильтры, при этом можно выделить две подформы:

a) *ПИД-регулятор с фильтром дифференциальной составляющей:*

$$C(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} \right),$$

где  $N = 2 \div 20$  [5].

Эта форма используется в следующих продуктах:

Bailey Net 90 PID error input product при  $N = 10$  и FC156 Independent Form PID algorithm

Concept PIDP1 and PID1 PID algorithms

Fischer and Porter DCU 3200 CON PID algorithm при  $N = 8$

Foxboro EXACT I/A series PIDA product (in which it is an option labelled ideal PID)

Hartmann and Braun Freelance 2000 PID algorithm

Modicon 984 product with  $2 \leq N \leq 30$

Siemens Teleperm/PSC7 ContC/PCS7 CTRL PID products при  $N = 10$  и the S7 FB41 CONT\_C PID product.

b) *ПИД-регулятор с фильтром по входу:*

$$C(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \frac{1}{(T_f s + 1)^n},$$

где  $T_f$  - постоянная фильтра,  $n$  - степень фильтра, выбираемая, как правило,  $n = 1$ .

4) *ПИД-регуляторы с модифицированной структурой.* Приведенные выше ПИД-регуляторы можно назвать стандартными, наряду с ними существует целый ряд предложений по модификации ПИД закона управления, основанных на так называемом упреждающем (feedforward) управлении. Следующая форма ПИД-регулятора носит название «ПИД-регулятор с весами задающего воздействия»:

$$u(t) = k_c (\alpha y^*(t) - y(t)) + k_I \int_0^t (y^*(\tau) - y(\tau)) d\tau + k_d \frac{d}{dt} (\beta y^*(t) - y(t)),$$

где  $y^*(t)$  - задающее воздействие,  $\alpha \in [0, 1]$  и  $\beta \in [0, 1]$  - варьируемые параметры.

В случае, если  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0$ , то такой регулятор называют ПИ-Д, а если  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ , то такой регулятор называют И-ПД.

Более подробный обзор существующих форм ПИД-регуляторов и названия использующих их продуктов приведены в [2].

## 1.2. Методы синтеза

Существующие на сегодня методы синтеза ПИД-регуляторов можно разделить на следующие группы.

- 1) **Интуитивная настройка.** Способ настройки подразумевает изменение параметров ПИД-регулятора независимо друг от друга по «интуиции» до тех пор, пока цель управления не будет достигнута.
- 2) **Характеристические методы.** Эти методы появились на основе практического опыта (так же как и методы Циглера-Никольса [15]) и подразумевают настройку регулятора по данным полученным в результате испытания в разомкнутом контуре.
- 3) **Аналитические методы (Алгебраический синтез).** Параметры ПИД-регулятора вычисляются из аналитических или алгебраических зависимостей между моделью объекта и целью управления (например, метод внутренней модели (ИМС) и лямбда настройка [1]). Как правило, аналитические методы дают простые формулы и могут быть использованы в адаптивных системах, однако требуется цель управления в аналитической форме и достаточно точная модель объекта управления.
- 4) **Частотные методы.** Частотные характеристики объекта управления используются для настройки ПИД-регулятора. Как правило, эти методы ресурсоемки и направлены синтез робастных ПИД-регуляторов.
- 5) **Оптимальный синтез.** Эти методы можно рассматривать как особый вид оптимального управления, где коэффициенты ПИД-регулятора с помощью численных методов оптимизации, компьютерных эвристики или эволюционных алгоритмов. Как правило, оптимизация требует значительное количество ресурсов и осуществляется во временной области.

Данная классификация не является исчерпывающей и ограничивающей. Некоторые методы, используемые на практике, относятся к нескольким группам. Наиболее полный перечень существующих методов синтеза ПИ- и ПИД-регуляторов можно найти в [2].

## 2. Автонастройка и алгоритмы адаптации ПИД-регуляторов

Автонастройка ПИД-регуляторов распространена на сегодня в большей степени, чем адаптация. Это вызвано тем, что алгоритмы адаптации зачастую сложнее алгоритмов автонастройки и требуют большей вычислительной мощности. Кроме того, алгоритмы автонастройки прошли некий период апробации, так как идеи заложенные в них основаны на простых методах настройки ПИД-регуляторов, подобные методам Циглера-Никольса. Алгоритмы адаптации только проходят этот этап и количество используемых адаптивных ПИД-регуляторов со временем растет. Ниже рассмотрены методы автонастройки и алгоритмы адаптации, применяемые в промышленных контроллерах, SCADA-системах и РСУ, а так же те, которые возможно будут широко применяться в будущем.

В таблице 1 сведены наиболее популярные на сегодняшний день ПЛК, которые реализуют алгоритмы автоматической настройки, адаптивного ПИД управления и опережающего управления.

Таблица 1. ПЛК, использующие автоматическую настройку и адаптацию

Производитель	Модель ПЛК	1	2	3	4
ABB	Bitric P	+	-	-	-
	Digitric 100	+	-	-	-
	COMMANDER 100	+	-	-	-
	COMMANDER 250	+	-	-	-
	COMMANDER 310	+	-	-	-
	COMMANDER 351	+	+	-	-

	COMMANDER 355	+	+	-	+
	COMMANDER 505	+	+	-	+
	COMMANDER V100	-	-	-	-
	COMMANDER V250	-	-	-	-

*Продолжение таблицы 1*

	ECA06	+	-	-	-
	ECA60	+	+	-	+
	ECA600	+	+	+	+
	MODCELL™ 2050R	+	-	-	-
	53SL6000	+	-	-	-
Foxboro	716C	+	-	+	-
	718PL, 718PR	+	-	+	-
	718TC, 718PR	+	-	+	-
	731C	+	-	+	-
	743C	+	-	+	-
	760C	+	-	+	-
	761C	+	-	+	-
	762C	+	-	+	-
	T630C	+	-	+	-
Honeywell	UDC100	-		-	-
	UDC700	+		+	-
	UDC900	+		+	-
	UDC1000, UDC1500	+		+	-
	UDC2300	+		+	-
	UDC3300	+	+	+	-
	UDC5000	+		+	-
	UDC6300	+	+	+	+
Yokogawa	US1000	+	+	-	+
	UT320, UT350, UT420, UT450, UT520, UT550, UT750	+	-	-	-
	UP350, UP550, UP750	+	-	-	-
	YS150	+	-	+	+
	YS170	+	+	+	+
Siemens	Simatic S7-200, S7-300, S7-1200	+	+	+	+
ОВЕН	ПЛК 100, 150, 154	+	-	-	-

Обозначения:

1 – Автоматическая настройка; 2 – Таблица параметров (Gain-Scheduling); 3 – Адаптивное управление; 4 - Опережающее управление (Feedforward control).

*1.1. Методы автонастройки*

В основе методов автонастройки лежат идеи, предложенные Циглером и Никольсом [5, 15], но претерпевшие ряд изменений. Таким образом, можно выделить два подхода.

### 1) Автонастройка по переходной характеристике ОУ.

В данном подходе параметры ПИД-регулятора выбираются на основе анализа переходной характеристики ОУ, полученной в результате ступенчатого воздействия. Недостатком этого подхода является то, что подаваемая ступенька должна быть достаточной величины для того, чтобы на фоне помех и внешних возмущений можно было выделить составляющую переходного процесса.

### 2) Автонастройка с помощью автоколебаний.

Данный подход подразумевает искусственное создание автоколебаний в контуре управления, что позволяет идентифицировать так называемую критическую точку (точку пересечения годографа АФЧХ замкнутой системы с отрицательной действительной осью  $(-1;0j)$ ) путем измерения амплитуды и частоты автоколебаний, и использования формул пересчета для определения коэффициентов ПИД-регулятора. В работе [19] предлагается использовать П-регулятор, повышением коэффициента которого добиваться установившихся автоколебаний. В других работах [4, 5, 7, 8], для этой цели используется двухпозиционное реле, либо реле с гистерезисом, что позволяет вызывать ограниченные по амплитуде автоколебания.

## 1.2. Алгоритмы адаптации

Как говорилось выше, существующие алгоритмы адаптации можно разделить на две группы: прямые и непрямые. Рассмотрим их подробнее.

### 1) Прямые адаптивные системы.

В прямых алгоритмах адаптивного управления параметры регулятора обновляются непосредственно, по определенному закону, который зависит от состояния замкнутой системы. Для того чтобы оценить состояние системы используются различные техники.

Прямые адаптивные системы, использующие логические правила настройки регулятора (rule-based), представляют целый подкласс систем управления [5]. Принцип действия основан на имитации действий наладчика, который, анализируя состояние выхода системы, при изменении задающего воздействия, корректирует параметры ПИД-регулятора. Во время функционирования всегда ищется компромисс между наименьшим временем переходного процесса и запасами устойчивости. Типичные правила настройки ПИД-регулятора приведены в таблице 1. Этот метод так же может применяться для автонастройки ПИД-регулятора.

Таблица 1. Правила настройки ПИД-регулятора

	Время ПП	Перерегулирование	Запасы устойчивости
Увеличение $k_c$	Уменьшается	увеличивается	ухудшаются
Увеличение $k_I$	медленно уменьшается	увеличивается	ухудшаются
Увеличение $k_D$	медленно уменьшается	уменьшается	улучшаются

Для управления ОУ поведение которых описывается сложными и/или нелинейными моделями часто используют таблицы параметров (Gain scheduling). При этом необходимо выделить определенные режимы работы ОУ, на которых цель управления достигается с теми или иными коэффициентами ПИД-регулятора. Режим ОУ определяется по одной из переменных состояния доступных измерению или задающему воздействию (к примеру, для самолетов – высота полета, для автомобилей - скорость вращения коленвала), а коэффициенты ПИД-регулятора выбираются из таблицы в зависимости от текущего режима. Коэффициенты каждого режима, как правило, определяют в лабораторных или экспериментальных условиях при разработке системы управления.

Благодаря своей простоте, такие адаптивные системы распространены в производстве [6, 9].

Среди перспективных прямых алгоритмов адаптивного управления можно выделить следующие.

Алгоритм итеративной градиентной настройки (Iterative feedback tuning) способен функционировать при непредсказуемых изменениях параметров ОУ, при мало выраженных внешних возмущениях. Впервые метод был предложен в работе [9] и описан в книге [5]. Основная идея заключается в вычислении градиента по коэффициентам ПИД-регулятора относительно ошибки слежения. Для вычисления градиента метод использует ступенчатые испытательные воздействия, подаваемые на вход замкнутой системы. По вычисленному градиенту корректируются параметры ПИД-регулятора.

Метод рекуррентных целевых неравенств [19] так же относится к прямым алгоритмам адаптивного управления. Суть метода заключается в использовании целевых неравенств, зависящих от текущих и предыдущих значений измеряемых переменных, состояния ОУ и управления, построенных на основе выбранной цели управления. При функционировании алгоритма сразу все целевые неравенства недоступны, они возникают по ходу функционирования и поэтому решаются рекуррентно, в результате чего метод получил свое название. Для решения рекуррентных целевых неравенств используются конечно сходящиеся алгоритмы, суть которых заключается в том, что при достижении цели управления параметры закона управления перестают корректироваться.

## **2) Непрямые алгоритмы адаптации.**

Многие не прямые алгоритмы адаптации являются дальнейшим развитием алгоритмов автоматической настройки. Так в работах [4, 7] были развиты идеи идентификации критической точки и предложено использовать метод наименьших квадратов (МНК) для идентификации этой точки. Далее этот подход развит в работе [10], где предложено использовать несколько идентификаторов совместно с узкополосными фильтрами, что позволило повысить гибкость алгоритма адаптации. Множество алгоритмов, к примеру [12, 13], используют в своей основе метод наименьших квадратов, позволяющий идентифицировать различные модели ОУ. Для синтеза ПИД-регуляторов в части работ, используются алгебраические методы синтеза, в другой части работ используются методы оптимизации.

Алгоритм адаптации по реакции системы на ступеньку развивается в работах [22, 23, 24]. Первоначальную настройку ПИД-регулятора осуществляет по результатам эксперимента в разомкнутом контуре, то есть выполняется предварительная автоматическая настройка регулятора. Затем последующая коррекция коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется по результатам анализа реакции системы на ступенчатое изменение задающего воздействия или управления, не превышающее 10% от номинального значения.

Аналогичный подход описан в книге [19] предлагаются алгоритмы адаптации, использующие релейный подход. Первоначальная настройка регулятора осуществляется с помощью замыкания ОУ двухпозиционным реле. Измеряется амплитуда и период возникших автоколебаний, по значениям которых затем синтезируется ПИД-регулятор. При необходимости подстройки коэффициентов ПИД-регулятора двухпозиционное реле подключается параллельно с регулятором.

Перспективным направлением в развитии не прямых адаптивных алгоритмов управления является частотное адаптивное управление. Идея данного подхода заключается в использовании полигармонического испытательного сигнала, подаваемого на вход системы управления. Такая необходимость возникает при недостаточно «богатом» гармониками задающем воздействии, например, если оно постоянно. С помощью фильтра Фурье [16] можно выделить полез-

ную составляющую, несущую информацию об ОУ, и, таким образом, оценить параметры модели ОУ даже при интенсивных неизвестных внешних возмущениях. Данный подход предложен в [19]. Существуют некоторые вариации алгоритма. В первой вариации на вход системы подается одна гармоника с частотой равной резонансной частоте системы и определяется амплитуда и фаза установившихся колебаний на входе и выходе ОУ, на основе которых определяются параметры модели ОУ. Для первоначального определения резонансной частоты системы предлагается возбудить автоколебания в системе управления с помощью двухпозиционного реле или путем увеличения коэффициента усиления регулятора. Во второй вариации используется дву- и более частотный испытательный сигнал. Частоты гармоник испытательного сигнала при этом должны находиться относительно “далеко” друг от друга. Этот подход позволяет оценивать модели ОУ с более сложной структурой.

Алгоритм частотного адаптивного управления развивается в работах [3, 16, 17], где так решаются ключевые вопросы выбора частот и амплитуд гармоник испытательного сигнала. Рассмотрим этот алгоритм подробнее.

Модель ОУ представляется в виде звена первого порядка с запаздыванием в канале управления:

$$y(t) = \frac{k_o(t)}{T(t)p + 1} u(t - \tau(t)) + f(t), \quad (1)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  - оператор дифференцирования,  $y(t)$  - выход ОУ,  $u(t)$  - вход ОУ, формируемый регулятором (сигнал управления),  $f(t)$  - неизменяемое произвольное внешнее возмущение,  $k(t)$ ,  $T(t)$  и  $\tau(t)$  - неизвестные параметры.

ПИД-регулятор с фильтром по входу имеет вид:

$$u(t) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) \frac{1}{(T_f p + 1)} \varepsilon(t), \quad (2)$$

где

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t) + v(t), \quad (3)$$

ошибка слежения,  $v(t)$  - испытательный сигнал.

Синтез ПИД-регулятора осуществляется на основе оценок параметров модели (1) с помощью метода внутренней модели (ИМС) [5]:

$$k_c = \frac{2\hat{T} + \hat{\tau}}{2\hat{k}_o(\lambda + \hat{\tau})}, \quad T_I = \frac{2\hat{T} + \hat{\tau}}{2}, \quad T_D = \frac{\hat{T}\hat{\tau}}{2\hat{T} + \hat{\tau}}, \quad T_f = \frac{\lambda\hat{\tau}}{2(\lambda + \hat{\tau})}, \quad (4)$$

где  $\lambda = \frac{\hat{T}}{2 \div 4}$  - параметр, характеризующий быстродействие системы.

При таком регуляторе поведение замкнутой системы (при  $f(t) = 0$ ) с точностью до ПАДЕ-аппроксимации первого порядка можно описать следующим уравнением:

$$y(t) = \frac{1}{\lambda p + 1} y^*(t - \tau).$$

Для предварительной настройки ПИД-регулятора необходимо знать оценки параметров модели в начальный момент времени  $k_o(0)$ ,  $T(0)$  и  $\tau(0)$ . В процессе функционирования алгоритма предполагается, что параметры модели (1) можно считать постоянными на некоторых интервалах времени, именуемых режимами,  $k_o(t)|_{t_i}^{t_{i+1}} = const$ ,  $T(t)|_{t_i}^{t_{i+1}} = const$  и



$\tau(t)|_{t_i}^{t_{i+1}} = const$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N$ ), длительность которых достаточно для проведения идентификации. Для такого случая модель (1) можно записать в следующем виде:

$$y(t) = \frac{k_o^{[i]}}{T^{[i]} p + 1} u(t - \tau^{[i]}) + f(t), \quad t_i \leq t < t_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N.$$

Идентификация ОУ на каждом режиме осуществляется следующим образом. Выбирается испытательный сигнал:

$$v(t) = \sum_{k=1}^2 \rho_k \sin \omega_k t.$$

Вход  $u(t)$  и выход  $y(t)$  ОУ прикладывается к фильтру Фурье:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{yk} = \alpha_{yk}(\bar{t}) &= \frac{2}{\rho_k \bar{t}} \int_{t_F}^{t_F + \bar{t}} y(t) \sin \omega_k t dt, & \hat{\alpha}_{uk} = \alpha_{uk}(\bar{t}) &= \frac{2}{\rho_k \bar{t}} \int_{t_F}^{t_F + \bar{t}} u(t) \sin \omega_k t dt, \\ \hat{\beta}_{yk} = \beta_{yk}(\bar{t}) &= \frac{2}{\rho_k \bar{t}} \int_{t_F}^{t_F + \bar{t}} y(t) \cos \omega_k t dt, & \hat{\beta}_{uk} = \beta_{uk}(\bar{t}) &= \frac{2}{\rho_k \bar{t}} \int_{t_F}^{t_F + \bar{t}} u(t) \cos \omega_k t dt, \end{aligned} \quad k = 1, 2,$$

где  $t_F$  - время начала фильтрации,  $\bar{t}$  - длительность фильтрации.

Выходы фильтра Фурье  $\alpha_{yk}(\bar{t})$ ,  $\beta_{yk}(\bar{t})$  и  $\alpha_{uk}(\bar{t})$ ,  $\beta_{uk}(\bar{t})$  при  $\bar{t} \rightarrow \infty$  сходятся к частотным параметрам системы [3]:

$$\alpha_{yk} + j\beta_{yk} = \frac{W_c(j\omega_k)W_o(j\omega_k)}{1 + W_c(j\omega_k)W_o(j\omega_k)}, \quad \alpha_{uk} + j\beta_{uk} = \frac{W_c(j\omega_k)}{1 + W_c(j\omega_k)W_o(j\omega_k)}, \quad k = 1, 2,$$

где  $W_c(j\omega_k)$ ,  $W_o(j\omega_k)$  - передаточные функции регулятора и ОУ соответственно.

Оценки частотных параметров ОУ

$$\alpha_k = \operatorname{Re} W_o(j\omega_k), \quad \beta_k = \operatorname{Im} W_o(j\omega_k), \quad k = 1, 2,$$

вычисляются через выходы фильтра Фурье следующим образом:

$$\hat{\alpha}_k = \frac{\hat{\alpha}_{yk} \hat{\alpha}_{uk} + \hat{\beta}_{yk} \hat{\beta}_{uk}}{\hat{\alpha}_{uk}^2 + \hat{\beta}_{uk}^2}, \quad \hat{\beta}_k = \frac{-\hat{\alpha}_{yk} \hat{\beta}_{uk} + \hat{\beta}_{yk} \hat{\alpha}_{uk}}{\hat{\alpha}_{uk}^2 + \hat{\beta}_{uk}^2}, \quad k = 1, 2.$$

Оценки параметров модели ОУ на режиме определяются из выражений:

$$\hat{T}^2 = \frac{(\hat{\alpha}_2^2 + \hat{\beta}_2^2) - (\hat{\alpha}_1^2 + \hat{\beta}_1^2)}{\omega_1^2 (\hat{\alpha}_1^2 + \hat{\beta}_1^2) - \omega_2^2 (\hat{\alpha}_2^2 + \hat{\beta}_2^2)}, \quad \hat{k}_o = (\hat{\alpha}_2^2 + \hat{\beta}_2^2)(\hat{T}^2 \omega_2^2 + 1), \quad \hat{\tau} = -\frac{1}{\omega_1} \arctan \frac{\hat{\beta}_1 + \hat{T} \hat{\alpha}_1 \omega_1}{\hat{\alpha}_1 - \hat{T} \hat{\beta}_1 \omega_1},$$

которые используются для синтеза «нового» ПИД-регулятора (2), на основе формул (4).

Общая структура системы приводится на рисунке 1.

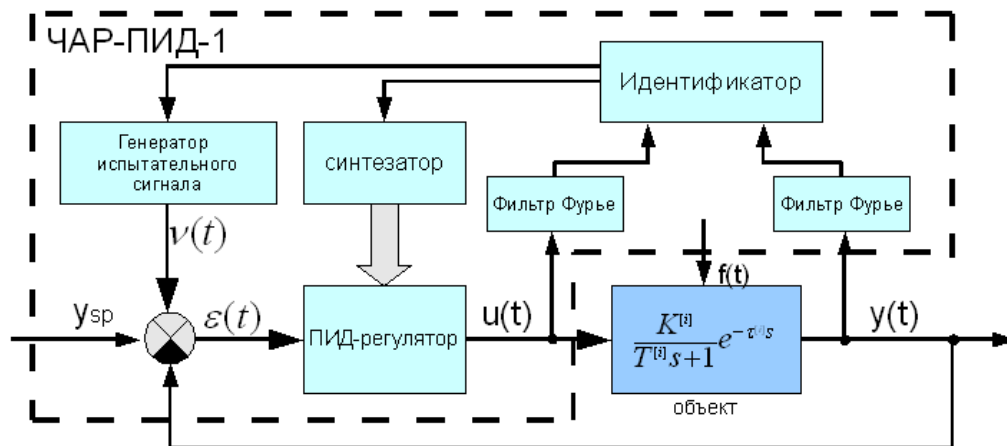


Рис. 1. Структурная схема система с частотным адаптивным ПИД-регулятором

### Заключение

Не смотря на достаточно разнообразную и неоднородную совокупность алгоритмов адаптивного управления, все еще остается достаточно большой разрыв между теорией и практикой. Во многом он связан с уже хорошо себя зарекомендовавшими алгоритмами автоматической настройки, модифицированные версии которых используются в алгоритмах адаптации. С другой стороны технологические объекты достаточно сложны и применение сложных алгоритмов адаптации, с большим количеством предположений, затруднительно. Тем не менее, потребности промышленности с каждым годом растут, что вызвано увеличением темпов производства, изменением технологии, повышением гибкости. Во многом это факторы, которые, в конечном итоге, создадут благоприятный фон для повсеместного использования адаптивных ПИД-регуляторов.

### Литература

1. Aidan O'Dwyer Handbook of PI and PID controller tuning rules, 2<sup>nd</sup> Edition. - London: Imperial College Press, 2006.
2. Aidan O'Dwyer Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3<sup>rd</sup> Edition. - London: Imperial College Press, 2009.
3. Alexandrov A.G. and Palenov M.V. Self-tuning PID-I controller //Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy. 28 Aug. - 2 Sept. 2011. PP. 3635\_3640.
4. Astrom, K.J., Hagglund T., Hang C.C. and Ho W.K. Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers - A Survey // Control Engineering Practice. 1993. V. 1. P. 699-714.
5. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
6. Blevins T.L., McMillan G.K., Wojsznis W.K. and B.M. W. Advanced Control Unleashed. - North Carolina: ISA, Research Triangle Park, 2003.
7. Hagglund, T., Astrom K.J. Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques // Automatica. 1991. V. 27. P. 599-609.
8. Hang C.C., Astrom K.J. and Ho W.K. Relay auto-tuning in the presence of static load disturbance // Automatica. 1993. V. 29. No. 2. P. 563-564.
9. Hjalmarsson H., Gevers M., Lequin O. Interactive feedback tuning: theory and applications // IEEE Control Systems Magazine. 1998. V. 18. No. 4. P. 26-41.
10. Ho W.K., Hang C.C., Wojsznis, W., Tao Q.H. Frequency Domain Approach to Self-Tuning PID Control // Control Eng. Practice. 1996. V. 4. No. 6. P. 807-813.
11. McMillan G.K. Tuning and Control Loop Performance, second edition. North Carolina: ISA, Research Triangle Park, 1983.

12. Sato T., Kameoka, K. *Self-Tuning Type-2 PID Control System and its Application* // *Proceeding of 17th IFAC World Congress. Seoul, Korea. 2008. P. 11287-11292.*
13. Suda N. et al. *PID Control. Japan: Asakura Shoten Co. Ltd., 1992.*
14. Voda A. and Landau I.D. *A method for the auto-calibration of PID controllers* // *Automatica. 1995. V. 31. No. 2. P. 41-53.*
15. Ziegler J.G., Nichols N.B. *Optimum settings for automatic controllers* // *Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759-768.*
16. Александров А.Г. *Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высшая школа, 1989.*
17. Александров А.Г. *Частотные регуляторы. // Автоматика и телемеханика. 1991. №1.*
  
18. Денисенко В.В. *ПИД-регуляторы: вопросы реализации. - СТА, №4, 2007, с. 86 - 97, №1, 2008, с. 86-99.*
  
19. Ротач В.Я. *Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов – 5ое издание. перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.*
  
20. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981.*
21. Штейнберг Ш.Е., Серезин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. *Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №7. с. 1-7.*
22. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. *Оптимальные автоматически настраивающиеся обшепромышленные регуляторы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. №10. с. 30-33.*
23. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. *Адаптивные автоматически настраивающиеся ПИД-регуляторы // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 6.*
24. Шубладзе А.М., Кузнецов С.И. *Автоматически настраивающиеся промышленные ПИ и ПИД-регуляторы // Автоматизация в промышленности. 2007. № 2.*