

УДК 62.503

**Иносов Сергей Викторович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов

**Корниенко Владимир Михайлович**

Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов

**Гречуха Вячеслав Валериевич**

Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев***АЛГОРИТМ АВТОНАСТРОЙКИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИГАРМОНИЧЕСКОГО ПРОБНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ**

***Анотація.** Запропоновано алгоритм адаптації з використанням бігармонійного пробного впливу на підпорядкований контур ПІ-регулювання і з автопідстроюванням частоти пробного впливу на частоту перерізу цього контуру. Показано, що адаптація відбувається неперервно, не заважаючи основному процесу регулювання, бо пробний вплив співрозмірний з рівнем шумів вимірювання. Алгоритм працездатний з зашумленими об'єктами регулювання, інваріантний до зміни динамічної моделі об'єкта і забезпечує широкий динамічний діапазон настроювання ПІ-регулятора.*

***Ключові слова:** автоматичне регулювання, ПІ-регулятор, адаптація, автопідстроювання*

***Аннотация.** Предложен алгоритм адаптации с использованием бигармонического пробного воздействия на подчиненный контур ПИ-регулирования и с автоподстройкой частоты пробного воздействия на частоту среза этого контура. Показано, что адаптация происходит непрерывно, не мешая основному процессу регулирования, поскольку пробные возмущения соизмеримы с уровнем шумов измерения. Алгоритм работоспособен с зашумленными объектами регулирования. Инвариантен к смене динамической модели объекта регулирования и обеспечивает широкий динамический диапазон настройки ПИ-регулятора.*

***Ключевые слова:** автоматическое регулирование, ПИ-регулятор, адаптация, авто-настройка*

***Annotation.** An adaptation algorithm, using biharmonic trial disturbance applied to the slave PI-control loop, with auto-tuning of the disturbance frequency, has been proposed and studied. Adaptation is executed continuously, without disrupting the main regulatory process, as the trial disturbance is commensurable with the level of measurement noise. The algorithm is operable with noisy plants. The algorithm is invariant to a change of the dynamic model of the plant. Wide dynamic range of auto-tuning is provided by three simple and almost independent additional control loops: a) phase-locked loop frequency control of the disturbance, b) regulating the closed loop gain at the cutoff frequency by varying the value of proportionality coefficient, c) regulating the closed loop gain at three times lower frequency by varying the value of integration constant. Parameters of the adaptation algorithm itself require no tuning and are constants for all possible applications.*

***Key words:** automatic control, PI-controller, adaptation, auto-tuning*

**Постановка проблеми**

При автоматизации технологических процессов широко используются системы автоматического регулирования. Их назначение – поддерживать на заданном уровне какие-либо технологические параметры (например, температуру). Преимущественно используется принцип регулирования по отклонению от задания при

наличии контура отрицательной обратной связи.

Типовым промышленным алгоритмом регулирования является Пропорционально-Интегрально-Дифференциальный (ПИД) регулятор [1; 2]. ПИД-алгоритм впервые предложен 100 лет назад и с тех пор не подвергался модификации – случай экстраординарный в области информатики. Это объясняется близостью ПИД-алгоритма к идеалу для большинства технологических объектов

регулювання і неможливістю його удосконалення [3]. ПІ-алгоритм широко використовується як частинний випадок ПІД-алгоритма для більш зашумлених об'єктів, для яких диференціюючий канал регулювання стає безплідним. Іменно цей варіант розглядається в даній роботі.

Пропорційно-Інтегральний (ПІ) регулятор має два налаштовуваних параметра – коефіцієнт пропорційності  $K_p$  і постійну часу інтегрування  $T_i$ .

Одним з найбільш важливих етапів впровадження систем автоматичного регулювання є налаштування регуляторів (присвоєння оптимальних чисельних значень налаштовуваним параметрам, які залежать від динамічних властивостей конкретного об'єкта регулювання). Від правильності налаштування регулятора залежать час регулювання, стійкість, динамічна помилка і інші критерії якості регулювання. Якщо налаштування не виконано (або виконано неправильно), якість регулювання може різко погіршитися, аж до втрати стійкості.

Процес налаштування може ускладнюватися тим, що динамічні властивості реального технологічного об'єкта зазвичай невідомі, теоретичні моделі, як правило, відсутні, експерименти на діючому об'єкті дуже дорогі і часто недопустимі. Крім того, динамічні властивості об'єктів, як правило, змінюються в ході технологічного процесу. Бывають випадки, коли налаштування регуляторів перетворюється в серйозну інженерну проблему.

Перспективним шляхом розв'язання проблеми налаштування регуляторів є використання так званих адаптивних (самоналаштовуваних, самонавчаних) регуляторів [4; 5; 6]. Ідея полягає в тому, що за роботою основного регулятора спостерігає спеціальна супервизорна програма – блок адаптації (автоналаштування, самонавчання), яка аналізує в реальному часі якість регулювання і намагається її покращити, змінюючи параметри налаштування підпорядкованого регулятора. Блок адаптації може виконувати пробні впливи на підпорядкований контур регулювання. Блок адаптації фактично автоматизує процедуру налаштування регулятора, яка традиційно виконується інженером вручну.

Існують численні теоретичні і експериментальні дослідження проблеми автоналаштування регуляторів, більш того, пропонуються комерційні варіанти алгоритмів адаптації. Однак, це напрямлення поки що є розвиваючою, пошуковою областю теорії автоматичного регулювання, в якій ще не досягнуті остаточні результати. Відсутні встановлені рекомендації по вибору алгоритму адаптації.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Встановлено, що перспективним напрямленням є розробка алгоритмів адаптації регуляторів з використанням гармонічних пробних впливів [4 – 7]. Однак до сих пор немає встановлених рекомендацій по поводі численних деталей можливої реалізації таких алгоритмів. Предложені варіанти мають ряд недоліків, наприклад, критичність до вибору динамічної моделі об'єкта, обмежений діапазон автоналаштування, необхідність налаштування самого адаптивного алгоритму, висока чутливість до зашумленості об'єкта регулювання, використання ненадійних пошукових процедур і т.п.

## Ціль дослідження

В даній роботі запропоновано алгоритм адаптації з використанням бігармонічного пробного впливу на підпорядкований контур регулювання і з автоналаштування частоти пробного впливу на частоту срезу цього контура. Ціллю дослідження є підтвердження переваг запропонованого алгоритму адаптації методами комп'ютерного моделювання динаміки регулювання.

## Ізложення основного матеріалу

На рис. 1 наведено структурну схему самоналаштовуваної (адаптивної) системи автоматичного регулювання.

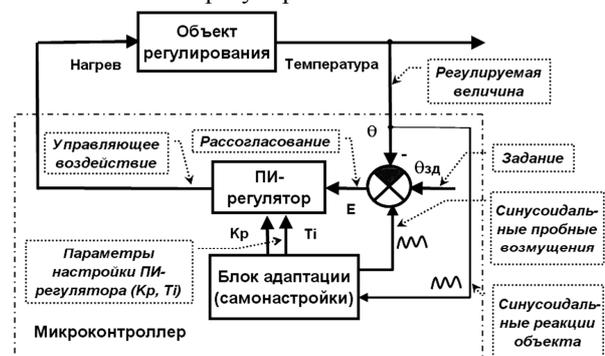


Рис. 1. Структурна схема самоналаштовуваної системи автоматичного регулювання

Основний ПІ-регулятор стабілізує, наприклад, температуру об'єкта регулювання  $\theta$ , яка вимірюється відповідним датчиком. Ця регульована величина (температура) порівнюється з заданням  $\theta_{\text{зад}}$  і вираховується рассогласование  $E$ . Значок  $\otimes$  означає суматор. Зачернений сектор означає зміну знаку. В залежності від рассогласования, основний ПІ-регулятор коректує потужність нагріву в діапазоні 0 – 100% (управляючий вплив  $U$ ) з метою зменшити рассогласование  $E$  до нуля.

Зависимость управляющего воздействия  $U$  от рассогласования  $E$  (алгоритм работы ПИ-регулятора) описывается передаточной функцией [1; 2]:

$$W_{PI}(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right). \quad (1)$$

Передаточную функцию можно интерпретировать как формульное представление амплитудо-фазо-частотной характеристики (АФЧХ), т.е. зависимости комплексного коэффициента усиления от частоты, если вместо  $p$  подставить  $j\omega$  ( $\omega$  – круговая частота,  $j$  – мнимая единица).

ПИ-регулятор содержит два параллельных канала – пропорциональный и интегрирующий ( $1/p$  – передаточная функция интегрирования). Усиление по каналам задается настройкой двух параметров – коэффициента пропорциональности  $K_p$  и постоянной времени интегрирования  $T_i$ . Этим параметрам нужно присвоить оптимальные (для данного объекта регулирования) численные значения, что называется настройкой регулятора. Если настройка не выполнена (или выполнена неправильно), качество регулирования может резко ухудшиться, вплоть до потери устойчивости. Только при оптимальной настройке ПИ-регулятор реализует все свои преимущества: высокое быстродействие, нулевая статическая ошибка регулирования, минимальная динамическая ошибка регулирования.

Процедуру настройки регулятора, которая традиционно выполняется вручную инженером, автоматизирует блок адаптации. Это специальная супервизорная программа, которая наблюдает за работой основного ПИ-регулятора, анализирует качество его работы и пытается его автоматически улучшить, изменяя параметры его настройки ( $K_p$  и  $T_i$ ). Для решения этой задачи блок адаптации осуществляет пробные возмущения на подчиненный контур регулирования.

В предлагаемом варианте пробные возмущения синусоидальны. Они добавляются к заданию. Фактически, заданная температура колеблется относительно установленного значения. Эти колебания весьма малы, соизмеримы с уровнем шумов измерения, и не мешают основному процессу регулирования температуры. Таким образом, процесс автонастройки подчиненного ПИ-регулятора можно осуществлять непрерывно, одновременно с основным процессом регулирования температуры. Реакция объекта на синусоидальное возмущение также будет синусоидальной с такой же частотой, что следует из линейности объекта для малых возмущений. Блок адаптации анализирует синусоидальную реакцию регулируемой величины (температуры объекта) на пробное синусоидальное возмущение, что позволяет ему находить оптимальную настройку параметров подчиненного ПИ-регулятора с использованием частотных критериев оптимальности.

Использованные частотные критерии оптимальности настройки ПИ-регулятора иллюстрируются рис. 2, на котором приведена типичная Логарифмическая Амплитудо-Частотная Характеристика (ЛАЧХ) замкнутого контура регулирования по каналу «задание-регулируемая величина». Это зависимость безразмерного соотношения (амплитуда колебаний регулируемой величины)/(амплитуда колебаний задания) от частоты колебаний  $\omega$ .

Представленная на рис. 2 ЛАЧХ рассчитывалась подстановкой  $j\omega$  вместо  $p$  в передаточную функцию замкнутого контура регулирования по каналу «задание – регулируемая величина»  $W_{closed}(p)$  с последующим вычислением модуля полученного выражения.  $W_{closed}(p)$ , в свою очередь, выражается через передаточную функцию разомкнутого контура  $W_{open}(p)$  по известной формуле [1; 2]:

$$W_{closed}(p) = \frac{W_{open}(p)}{1 + W_{open}(p)}, \quad (2)$$

$W_{open}(p)$ , в свою очередь, определяется передаточными функциями объекта регулирования  $W_o(p)$  и регулятора  $W_1(p)$  по формуле:

$$W_{open}(p) = W_o(p) \cdot W_1(p). \quad (3)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора приведена выше (1). Типовая передаточная функция теплового объекта имеет вид [3]:

$$W_o(p) = \frac{K \cdot e^{-pT_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (4)$$

где  $K$  – статический коэффициент передачи объекта,  $T_3$  – время запаздывания,  $T_1, T_2$  – первая и вторая постоянные времени объекта.

Такая модель объекта может считаться универсальной, пригодной для любых тепловых объектов, т.к. она учитывает все существенные особенности таких объектов: статизм, наличие аperiodических инерционностей (учитываются две основные с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ .) и наличие запаздывания  $e^{-pT_3}$ , которое относительно мало в общей инерционности объекта, но сильно ограничивает запас устойчивости регулирования. Даже, если объект не имеет «транспортного» запаздывания, передаточная функция  $e^{-pT_3}$  интегрально учитывает все малые инерционности, не учтенные двумя основными постоянными времени.

Частотные критерии оптимальности настройки выгодно отличаются универсальностью, так как вид графика на рис. 2 почти не зависит от конкретных численных значений параметров объекта регулирования и даже от принятой динамической модели объекта. Сплошная линия на рис. 2 соответствует оптимальной настройке регулятора, точечная линия соответствует слишком сильной

обратной связи (появляется резонансный пик), пунктирная линия соответствует слишком слабой обратной связи (сужается частотная полоса пропускания).

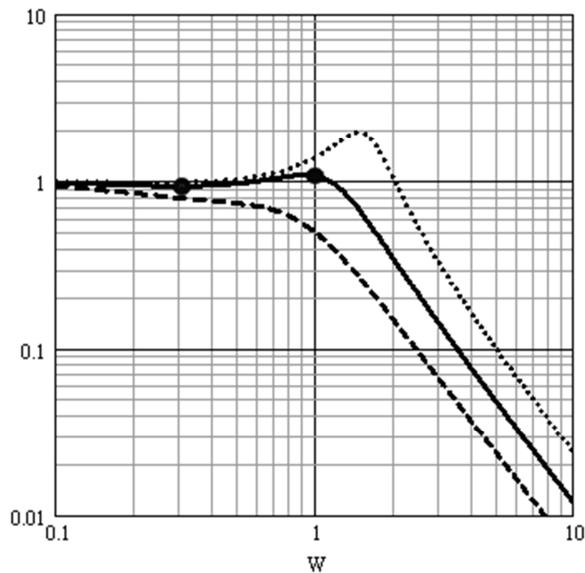


Рис. 2. Типичная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) замкнутого контура регулирования (задание-регулируемая величина). Сплошная линия соответствует оптимальной настройке

На низких частотах коэффициент усиления стремится к единице, так как система успевает обрабатывать изменения задания и колебания температуры точно соответствуют колебаниям задания (соотношение амплитуд равно 1).

На высоких частотах коэффициент усиления убывает с ростом частоты, так как система уже не успевает обрабатывать быстрые изменения задания из-за тепловой инерционности объекта. Граничная частота называется «частота среза». Это верхняя граница частотной полосы пропускания, в которой система автоматического регулирования работоспособна. Частота среза при оптимальной настройке принята за единицу на рис. 2.

Здесь следует обратить внимание на важность правильного выбора места приложения пробного синусоидального возмущения. Только в случае, если возмущение добавляется к заданию, а реакция регистрируется на выходе объекта, соотношение их амплитуд гарантировано имеет порядок единицы и безразмерно, а частотная характеристика приобретает универсальный вид, независимый от свойств объекта регулирования, что резко упрощает задачу автонастройки. Другие возможные варианты выбора точек входа и выхода (например, подача возмущения на вход объекта или регулятора) создадут дополнительную неопределенность, так как амплитуда реакции может сильно отличаться от амплитуды возмущения.

Критерий оптимальности настройки следующий. Нужно так настроить параметры

ПИ-регулятора, чтобы частота среза была максимально возможной для данного объекта (частотная полоса пропускания как можно шире). Но при этом на частоте среза не должен появиться резонансный пик. Кроме того, ошибка регулирования на более низких частотах должна быть минимальной (коэффициент усиления должен быть как можно ближе к единице). Для выполнения указанных условий *потребуем, чтобы усиление на частоте среза составляло 1.05, а на частоте 1/3 от частоты среза усиление составляло 0.95. То есть оптимальный график на рис. 2 должен проходить через две отмеченные жирные точки.* Это и есть принятое условие оптимальности настройки. Во временной области это условие соответствует максимальному быстродействию (время регулирования минимально).

Для поиска оптимума нет необходимости использовать сложные и ненадежные поисковые алгоритмы. Как выяснилось, настройку можно осуществить простыми и почти независимыми дополнительными контурами регулирования.

Настройку усиления на частоте среза можно осуществить варьированием  $K_p$ . Если усиление больше 1.05 (в основном контуре регулирования возникает резонанс), то  $K_p$  нужно автоматически уменьшать. Если коэффициент усиления меньше 1.05 (вялое регулирование в основном контуре), то  $K_p$  нужно автоматически увеличивать. Эту задачу реализует дополнительный контур регулирования  $K_p$ .

Настройку усиления на пониженной (в три раза) частоте можно осуществить варьированием  $T_i$ . Если коэффициент усиления больше 0.95, то  $T_i$  нужно автоматически увеличивать. Если коэффициент усиления меньше 0.95, то  $T_i$  нужно автоматически уменьшать. Эту задачу реализует дополнительный контур регулирования  $T_i$ .

Таким образом, для автонастройки параметров ПИ-регулятора достаточно двух синусоидальных пробных возмущений (основное на частоте среза, дополнительное на частоте в три раза меньше). Однако, сначала нужно еще найти эту частоту среза. Для этого нужен еще один контур регулирования, который автоматически настроит частоту основного пробного возмущения на частоту среза.

Автоподстройку частоты пробного возмущения лучше всего осуществлять по фазовому сдвигу между пробным возмущением и реакцией регулируемой величины. При правильной настройке частоты этот фазовый сдвиг составляет  $-90^\circ$ . Если фазовый сдвиг отличается от  $-90^\circ$ , частоту нужно автоматически изменять с учетом знака рассогласования. Эту задачу и выполнит контур автоподстройки частоты пробного возмущения.

Указанные дополнительные три контура регулирования вместе составляют алгоритм адаптации.

Алгоритм адаптации должен быть реализован программно в регулирующем микроконтроллере и должен удовлетворять следующим техническим требованиям.

В предлагаемом алгоритме автонастройки ПИ-регулятора должны использоваться два синусоидальные (гармонические) пробные возмущения с соотношением частот 1:3. Они добавляются к заданию. Фактически заданная температура колеблется относительно установленного значения. Эти колебания малы, соизмеримы с уровнем шумов измерения и не мешают основному процессу регулирования температуры. Таким образом, процесс автонастройки подчиненного ПИ-регулятора можно осуществлять непрерывно, одновременно с основным процессом регулирования температуры.

Блок адаптации анализирует синусоидальные реакции регулируемой величины (температуры объекта) на два пробные синусоидальные возмущения разных частот, что позволяет ему находить оптимальную настройку параметров подчиненного ПИ-регулятора с использованием частотных критериев оптимальности.

Благодаря свойству линейности объекта для малых возмущений, реакция системы на синусоидальное воздействие тоже синусоидальна, причем сохраняется частота. Другими могут быть лишь амплитуда и фаза. Более того, отсутствует перекрестное влияние между частотными каналами. Возмущения разных частот проходят через систему независимо друг от друга. Коэффициент усиления и фазовый сдвиг для основного возмущения могут быть определены независимо от наличия дополнительного возмущения и наоборот.

Частота основного пробного синусоидального возмущения автоматически устанавливается равной частоте среза подчиненного контура регулирования (частота среза – это верхняя граница частотной полосы пропускания, в которой контур регулирования еще успевает точно отрабатывать изменения задания). Для этого используется отдельный контур автоподстройки частоты пробного возмущения.

Частота дополнительного пробного возмущения в три раза ниже частоты основного пробного возмущения. Дополнительное возмущение действует одновременно с основным, поэтому используемое пробное возмущение фактически является бигармоническим (сумма двух синусоид).

К заданной температуре добавляется бигармоническое пробное возмущение. В результате заданная температура колеблется относительно установленного значения ( $20^{\circ}$  в данном примере), что видно на осциллограмме (рис. 3). Осциллограмма получена путем моделирования динамики регулирования в реальном времени в программной среде VisSim.

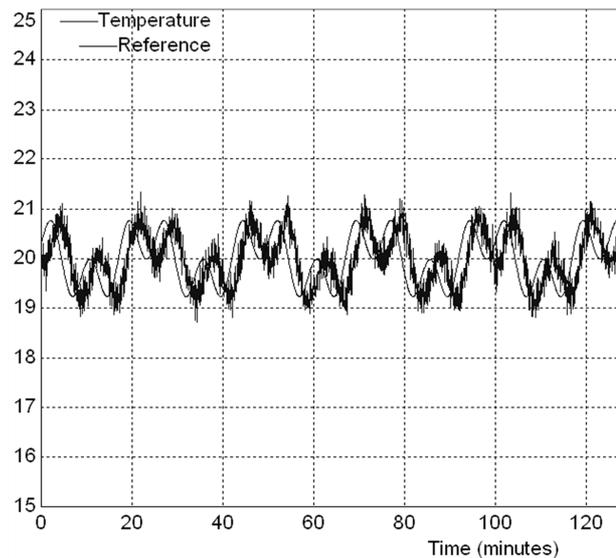


Рис. 3 Пробное бигармоническое возмущение задания (гладкая линия) и реакция на него регулируемой величины (зашумлена помехами)

Для примера, на рис. 3 приняты численные значения амплитуд обеих синусоид  $0.5^{\circ}$ . Меньшие амплитуды будут плохо различимы на осциллограмме на фоне шума, хотя в реальности целесообразно взять значения в несколько раз меньше. Синусоидальная реакция легко выделяется даже при сильной зашумленности специальными фильтрами, поэтому предлагаемый алгоритм адаптации весьма помехоустойчив.

Анализ реакции подчиненного контура регулирования на пробное возмущение и выделение амплитуд и фаз производится следующим образом.

Сначала определяются синфазная и квадратурная составляющие реакции системы регулирования на синусоидальное пробное возмущение. Для этого реакция объекта, полученная от датчика температуры, умножается на синусоиду (совпадающую по фазе с возмущением) и косинусоиду (сдвинутую по фазе на  $90^{\circ}$ ). Результаты умножения усредняются линейными фильтрами. Так как предполагается автонастройка в широком динамическом диапазоне, то постоянные времени сглаживающих фильтров автоматически подстраиваются обратно пропорционально частоте пробного возмущения. Полная амплитуда реакции системы вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов синфазной и квадратурной составляющих. Фазовый сдвиг между пробным возмущением и реакцией системы на него вычисляется как арккосинус отношения синфазной составляющей к полной амплитуде. Фазовый сдвиг используется затем для автоподстройки частоты основного пробного возмущения. Его искомое (оптимальное) значение составляет  $-90^{\circ}$ .

Таким образом, для автонастройки параметров подчиненного ПИ-регулятора температуры используются три дополнительных регулятора. Все указанные регуляторы регулируют по отклонению и используют интегрирующий алгоритм регулирования, гарантирующие нулевую ошибку регулирования в установившемся режиме. Например, автонастройка частоты пробного возмущения осуществляется следующим образом. Текущее значение настраиваемого параметра (фазы) сравнивается с заданным значением  $90^\circ$ , рассогласование подается на интегрирующий блок, выход которого и определяет текущую частоту пробного возмущения.

Следует иметь в виду, что частотные характеристики (рис. 2) имеют смысл только для синусоидальных возмущений, параметры которых (частота, амплитуда, фаза) квазистационарны, то есть почти не изменяются за один период колебаний. Поэтому должна быть соблюдена следующая иерархия быстродействий контуров регулирования:

1. Подчиненный контур ПИ-регулирования температуры самый быстрый
2. Контур автоподстройки частоты работает медленнее
3. Контур автонастройки  $K_p$  работает еще медленней
4. Контур автонастройки  $T_i$  самый медленный

Для того чтобы все контуры регулирования устойчиво взаимодействовали, их постоянные времени интегрирования (определяющие быстродействие) должны образовывать геометрическую прогрессию с показателем не менее трех.

Кроме того, так как инерционность разных объектов может отличаться в очень широких пределах (на много порядков), то в универсальном алгоритме адаптации постоянные времени контуров автонастройки должны автоматически приспособляться к изменениям частоты среза. Если частота среза высокая (объект почти безинерционный), то автонастройка осуществляется быстро. Если частота среза малая (объект очень инерционный), то автонастройка осуществляется медленно.

Кроме того, так как настраиваемые параметры могут меняться в очень широких пределах (на много порядков), то в универсальном алгоритме адаптации быстродействие контуров автонастройки должно автоматически приспособляться к изменениям порядка настраиваемых величин. Большие величины должны изменяться большими абсолютными приращениями. Малые величины должны изменяться малыми абсолютными приращениями. Относительная скорость изменения (% / мин) не должна зависеть от порядка настраиваемой величины.

Работа алгоритма адаптации, реализующего все вышеуказанные технические требования,

исследовалась путем моделирования динамики регулирования в реальном времени в программной среде VisSim.

Задача алгоритма адаптации – автоматически изменять параметры настройки ПИ-регулятора (коэффициент пропорциональности  $K_p$  и постоянную времени интегрирования  $T_i$ ) оптимальным образом при изменениях динамических свойств объекта регулирования в ходе технологического процесса. Как выяснилось, предлагаемый алгоритм адаптации правильно выполняет свою задачу при любых возмущениях параметров объекта в пределах одного порядка.

Например, проверялась реакция системы на мгновенное увеличение статического коэффициента передачи объекта  $K$  в 2 – 4 раза. Такое возмущение автоматически компенсируется (после переходного процесса) уменьшением коэффициента пропорциональности  $K_p$  ПИ-регулятора во столько же раз. Теоретически так и должно быть, так как оптимальный запас устойчивости основного контура регулирования по усилению определяется только произведением  $K \cdot K_p$ .

Второй пример. Проверялась реакция системы на мгновенное увеличение запаздывания в объекте  $T_3$  в 2 – 4 раза. Такое возмущение компенсируется уменьшением коэффициента пропорциональности  $K_p$  ПИ-регулятора. Постоянная времени интегрирования  $T_i$  не изменяется. Теоретически так и должно быть, так как в пределе, когда запаздывание становится преобладающей инерционностью в объекте, оптимальным является интегрирующий регулятор (вообще без пропорционального канала).

Третий пример. Проверялась реакция системы на мгновенное уменьшение всех постоянных времени объекта  $T_1, T_2, T_3$  в 2 – 4 раза (объект заменяется менее инерционным). Такое возмущение автоматически компенсируется соответствующим уменьшением постоянной времени интегрирования  $T_i$  ПИ-регулятора (как и должно быть теоретически). При этом частота среза увеличивается, а время регулирования уменьшается соответственно.

Несмотря на учет возможности больших параметрических возмущений (больше, чем на порядок), изменения параметров объекта должны происходить медленно (по сравнению с его инерционностью). В ходе исследования выяснилось, что очень большие и одновременно быстрые параметрические возмущения нарушают правильную работу алгоритма адаптации. Однако такие экстремальные случаи в практике автоматизации не встречаются. Как правило, в реальных технологических объектах изменения параметров происходят медленно и не превышают одного порядка. При таких условиях правильная работа предлагаемого алгоритма автоподстройки ПИ-регулятора гарантирована.

## Выводы

Процедуру настройки регулятора, которая традиционно выполняется инженером вручную, целесообразно автоматизировать. Для этого используется специальная супервизорная программа (блок адаптации), которая наблюдает за работой основного ПИ-регулятора, анализирует качество регулирования и пытается его улучшить, автоматически изменяя параметры настройки регулятора (коэффициент пропорциональности и  $K_p$  и постоянная времени интегрирования  $T_i$ ).

Адаптивное регулирование пока является развивающейся областью теории автоматического управления и нет установившихся рекомендаций по синтезу алгоритма адаптации.

В данной работе предлагается и исследуется алгоритм адаптации с использованием бигармонического пробного воздействия на подчиненный контур ПИ-регулирования и с автоподстройкой частоты пробного воздействия на частоту среза этого контура.

В результате компьютерного моделирования подтверждены следующие преимущества предложенного алгоритма адаптации.

Процесс адаптации происходит непрерывно, не мешая основному процессу регулирования, т.к. пробные возмущения соизмеримы с уровнем шумов

измерения. Несмотря на это алгоритм весьма помехоустойчив, так как синусоидальная реакция объекта легко отфильтровывается даже на фоне преобладающего шума.

Алгоритм автоподстройки не привязан к конкретной динамической модели объекта и работоспособен с любыми моделями объектов.

Обеспечивает очень широкий динамический диапазон настройки. Инерционные свойства объекта и оптимальные параметры настройки могут меняться на много порядков, что не является ограничением для процесса адаптации.

Не используются сложные поисковые алгоритмы, поведение которых может оказаться некорректным в частных случаях. Настройка осуществляется тремя простыми и почти независимыми дополнительными контурами регулирования: а) фазовая автоподстройка частоты пробного возмущения на частоту среза, б) настройка усиления замкнутого контура на частоте среза на значение 1.05 варьированием  $K_p$ , в) настройка усиления замкнутого контура на пониженной (в три раза) частоте на значение 0.95 варьированием  $T_i$

Параметры самого алгоритма адаптации не требуют настройки и являются константами для любых возможных применений.

## Список литературы

1. Євстифєєв, В. О. Теорія автоматичного керування. Ч. 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи: Навчальний посібник для ВУЗів, – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2006, – 288 с.
2. Попович, М. Г., Ковальчук, О. В. Теорія автоматичного керування. Підручник для ВУЗів. – К.: Либідь, 1997, – 315 с.
3. Иносов, С. В., Корнієнко, В. М. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами // Управління розвитком складних систем КНУБА. – 2013. – Вип. 13. – С. 104 – 108.
4. Александров, А. Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН: Теория и системы управления. – 1995. – № 2. – С. 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. – Иркутск, 2007. – Том 3: Управление и оптимизация. – С. 6–13.
7. Voda, A. A., Landau I. D. *A method for the Auto-calibration of PID Controllers* // *Automatica*. – 1995. – Vol. – 31. No. 1. – P. 41-53.

## References

1. Yevstifeev, V. O. (2006). *Theory of automatic control. V. 1. Continuous linear and nonlinear systems: Teaching aid for universities, Kremenchuk: PE Shcherbatych O. V., 288 p.*
2. Popovich, M. G. & Kovalchuk, O. V. (1997). *Theory of automatic control. Textbook for universities. Kyiv: Lybid, 315 p.*
3. Inosov, S. V. & Kornienko, V. M. (2013). *Optimization of automatic control algorithm for heating processes. Management of development of difficult systems. KNUCA: 13, 104 – 108.*
4. Alexandrov, A. G., (1995). *Adaptive control based on identification of frequency response* // *News of RAS: Theory and control systems: 2, 63–71.*
5. Alexandrov, A. G. & Baukova, N. G. (2000). *Frequencial adaptive PDD-controller* // *Proceedings of the UKACC International Conference on Control. Cambridge.*
6. Alexandrov, A. G. (2007). *Adaptive control of a plant with delay* // *Proceedings of the IX International Chetaev's conference "Analytical mechanics, stability and movement control", dedicated to 105-th anniversary of N.G. Chetaev. Irkutsk: Vol. 3: Control and optimization, 6 – 13.*
7. Voda, A. A. & Landau, I. D. (1995). *A method for the Auto-calibration of PID Controllers* // *Automatica: Vol. 31, no. 1, 41 – 53.*

Статья поступила в редколлегию 4.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслевич, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.