

*У роботі представлено метод швидкого адаптивного налаштування одноконтурних локальних систем автоматичного керування зі статичними об'єктами керування з використанням пробного гармонічного сигналу. Метод базується на аналізі властивостей вихідного сигналу системи та обчисленні налаштувань ПІ-регулятора, що гарантують аперіодичний перехідний процес. Даний метод адаптивного керування може широко використовуватись в одноконтурних системах управління локального рівня*

*Ключові слова: адаптивне налаштування, локальні системи, ПІ-регулятор, статичний об'єкт, пробний гармонічний сигнал*

*В работе представлен метод быстрой адаптивной настройки одноконтурных локальных систем автоматического управления со статическими объектами управления с использованием пробного гармонического сигнала. Метод основан на анализе свойств выходного сигнала системы и вычислении настроек ПИ-регулятора, гарантирующих аperiodический переходной процесс. Данный метод адаптивного управления может широко использоваться в одноконтурных системах управления локального уровня*

*Ключевые слова: адаптивная настройка, локальные системы, ПИ-регулятор, статический объект, пробный гармонический сигнал*

# АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЧАСТОТНОЙ НАСТРОЙКОЙ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

**А. В. Степанец**

Кандидат технических наук\*

E-mail: stepanets.av@gmail.com

**Д. А. Моторина\***

E-mail: daria.motorina@gmail.com

\*Кафедра автоматизации

теплоэнергетических процессов

Национальный технический

университет Украины

«Киевский политехнический институт»

ул. Политехническая, 6, г. Киев,

Украина, 03056

## 1. Введение

Качество настройки системы автоматического непосредственно влияет на параметры её переходного процесса, то есть на качество работы оборудования [1, 2]. Разработка адаптивных систем автоматического управления является актуальной задачей для решения вопросов быстрой и удобной настройки параметров алгоритмов управления. Зачастую для решения этой задачи используются цифровые регуляторы на основе микропроцессоров, позволяющие реализовать достаточно сложные алгоритмы обработки входных сигналов и последующую выдачу оптимальных настроек алгоритма управления [3]. В иерархии систем управления локальные одноконтурные системы являются самыми многочисленными, при этом они обладают меньшим количеством необходимых для поддержания основных параметров технологического процесса, следовательно, их адаптивная настройка наиболее рациональна и рентабельна [4, 5].

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопрос быстрой и эффективной настройки регуляторов является актуальным при работе с нестаци-

онарными объектами управления [6 – 8]. Отдельный класс адаптивных систем управления – класс самонастраивающихся регуляторов с пробным периодическим сигналом – использует принцип частотного разделения каналов управления и самонастройки [4, 7, 9].

В адаптивной системе управления [6], использующей принцип частотного разделения каналов, возможна непрерывная коррекция параметров регулятора, требуется наличие цифровых фильтров для отделения сигнала с частотами генератора гармонических колебаний, подаваемых на вход объекта управления, от сигнала с частотами контура управления. Применение заграждающего фильтра позволяет сохранить устойчивость в автоматической системе управления в процессе настройки регулятора, но при этом уменьшается стойкость замкнутой цепи системы. На практике заграждающие фильтры являются звеньями, по свойствам близкие к аperiodическим, при этом для подавления и частот генератора колебаний, и шумов необходим высокий порядок знаменателя передаточной функции такого фильтра. Это значительно уменьшает запасы устойчивости автоматической системы управления по фазе. Хотя в работе [6] был предложен метод компенсации влияния заграждающего фильтра (рис. 1), степень затухания переходного процесса значительным образом не снижается [6].

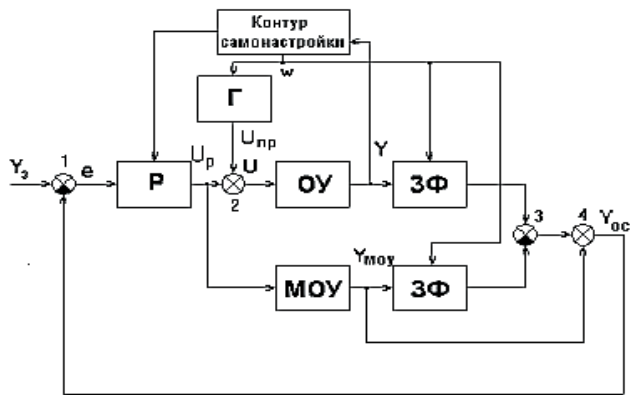


Рис. 1. Структура высококачественной адаптивной системы управления с ПИ – регулятором (1): Р – регулятор, Г – генератор гармонического сигнала, ОУ – объект управления, МОУ – модель объекта управления, ЗФ – заграждающий фильтр, U<sub>пр</sub> – сигнал пробных гармонических колебаний, U<sub>р</sub> – управляющий сигнал, Г – сигнал входного воздействия, Y – выходной сигнал ОУ, Y<sub>моу</sub> – выходной сигнал МОУ, Y<sub>ос</sub> – сигнал обратной связи

Для поиска нужной точки АФХ объекта управления могут использоваться избирательные фильтры, фильтры Фурье и вычислительные блоки [4]. В этом случае поиск параметров ПИД-регулятора проводится до момента достижения оптимальных настроек. Качество настройки ПИД-регулятора, а также итогового переходного процесса системы, при этом является высоким, но при сильном дрейфе параметров объекта управления оптимальная настройка может затянуться на недопустимо долгое время. Недостатком этого решения также является ресурсоемкость практической реализации описанных вычислительных методик.

При использовании пробного гармонического сигнала для самонастройки автоматической системы управления необходимо обладать минимальной априорной информацией об объекте управления. Некорректный выбор стартовой амплитуды и частоты гармонического сигнала может привести к выходу объекта управления из строя при слишком высокой амплитуде колебаний на выходе объекта управления, либо к бесполезности настроек таким методом, так как итоговый сигнал будет подавлен шумовыми фильтрами.

Решением проблемы является объединение возможностей частотной автонастройки автоматической системы управления и традиционных инженерных настроек одноконтурных систем. При таком тандеме инженерные настройки обеспечивают требуемые показатели качества [10], а частотная автонастройка не выводит систему из равновесия при неудачном поиске настроек.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка нового адаптивного метода управления, применимого для малых объектов управления в автоматических системах управления локального уровня. Адаптивное управление должно быть основано на достижении желаемого вида переходного процесса, используя при этом изменение параметров гармонического сигнала, подава-

емого на вход объекта управления. Переходной процесс в системе автоматического управления не должен превышать время  $3*(T+\tau)$ , где  $T$  и  $\tau$  – постоянная времени и величина транспортного запаздывания объекта управления соответственно. Величина максимального динамического отклонения переходного процесса по каналу «задание-выход» не должна превышать 10 %. Качество переходного процесса во время процесса адаптации должно оцениваться его прямыми показателями качества, при достижении требуемого времени переходного процесса и величины максимального динамического отклонения настройка прекращается.

### 4. Решение и визуализация поставленной задачи

Для решения поставленной задачи разработан метод настройки одноконтурных систем автоматического управления, основанный на свойствах исследуемого объекта и вспомогательной информации, которую несет сигнал на выходе объекта управления при подаче на него пробного гармонического сигнала.

Для повышения эффективности практического использования результаты должны быть представлены в виде обобщенных формул, приспособленных к внедрению в алгоритмическое обеспечение средств автоматизации.

Адаптивная система автоматического управления предназначена для работы с линейными статическими объектами управления с незначительной нестационарностью.

Структурная схема адаптивной системы управления представлена на рис. 2.

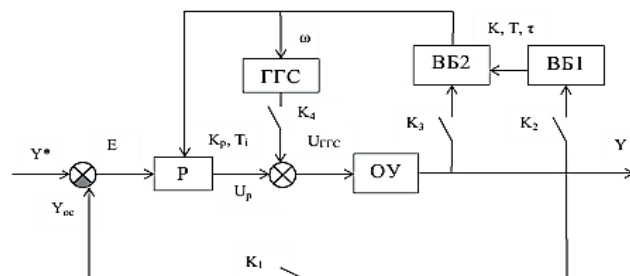


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы автоматического управления с частотной настройкой ПИ-регулятора: Y\* – сигнал задания, Y<sub>ос</sub> – сигнал обратной связи, Y – сигнал на выходе системы, E – сигнал рассогласования, Р – регулятор, ГГС – генератор гармонического сигнала, ОУ – объект управления, ВБ<sub>1</sub>, ВБ<sub>2</sub> – вычислительные блоки, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub> – ключи, K, T, τ – параметры объекта управления, ω – частота пробного гармонического сигнала, K<sub>p</sub>, T<sub>i</sub> – параметры ПИ - регулятора

При включении автонастройки системы управления в регуляторе устанавливаются начальные параметры  $K_p = 1, T_i = 0$ , то есть регулятор меняет структуру с ПИ- на П-закон регулирования для снятия разгонной характеристики с выхода объекта управления. При этом размыкаются ключи **K<sub>1</sub>** замыкаются ключи **K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>**. В генераторе гармонических сигналов устанавливается начальная частота гармонического сигнала. Гармонический сигнал суммируется с сигналом зада-

ния и подается на вход объекта управления. Длительность пробного гармонического сигнала определяется на основе априорной информации об объекте управления (его инерционности). С выхода объекта управления снимается разгонная характеристика, которая подается на вход вычислительного блока ВБ<sub>1</sub> и ВБ<sub>2</sub>, где проводится его идентификация. После определения параметров объекта управления данные передаются в вычислительный блок ВБ<sub>2</sub>, где на основе данных о параметрах объекта, данных об исходной частоте и амплитуде колебаний, снятых с выхода объекта, рассчитываются настройки ПИ-регулятора.

Закон ПИ-регулятора описывается формулой:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt). \quad (1)$$

Если параметры модели объекта управления установлены успешно, то ключ  $K_2$  размыкается. Переходной процесс в замкнутой системе управления моделируется вычислительным блоком ВБ<sub>2</sub>, если его прямые показатели качества удовлетворительны – настройки передаются в регулятор, если нет – идет адаптация настроек регулятора методом изменения частоты гармонических колебаний до получения удовлетворительного переходного процесса. При завершении поиска настроек регулятора замыкается ключ  $K_1$  и размыкаются  $K_3$  и  $K_4$  – система приходит в рабочее состояние.

Экспериментально установлено, что для объектов средней инерционности ( $T=50 \div 500$  с) начальную частоту гармонического сигнала можно брать в пределах  $\omega=0.01 \div 0.02$  Гц и амплитуду  $A=3 \div 10$  % от полного хода исполнительного механизма, поскольку в таких пределах амплитуда на выходе объекта управления позволяет получить эффективный массив данных, при этом не нанося большой вред технологическому процессу.

Для метода идентификации объекта управления был выбран метод прогнозирования оценки погрешности (Prediction Error Estimation Method – PEM). Методы группы прогнозирования оценки достаточно распространены в области идентификации технологических объектов управления [11], имеют ряд готовых решений для типовых объектов [11, 12] и при правильном выборе настроек поиска являются не ресурсоемкими для контроллеров и цифровых регуляторов. В случае данной работы вычислительный блок ВБ<sub>1</sub> изначально настроен на аппроксимацию разгонной характеристики аperiodическим звеном первого порядка с транспортным запаздыванием.

Для начальных настроек ПИ-регулятора экспериментально получены формулы вида:

$$T_{кр} = \frac{1}{\omega}, \quad (2)$$

$$K_p = \frac{0.9}{\pi \cdot A}, \quad (3)$$

$$T_i = T_{кр} \cdot (1 + 0.7 \frac{\tau}{T}) + 0.01T, \quad (4)$$

где  $\omega$  – частота колебаний сигнала на выходе с объекта управления,  $A$  – амплитуда колебаний сигнала на выходе с объекта управления,  $\tau$  – транспортное запазды-

вание объекта управления,  $T$  – постоянная времени объекта управления.

Период колебаний на частоте гармонических сигналов  $T_{кр}$  рассчитывается по формуле (2), единицы измерения частоты – герцы. В поиске коэффициента передачи регулятора  $K_p$  по формуле (3) по амплитуде колебаний  $A$  заложена прямолинейная связь коэффициента усиления объекта управления  $K$  с амплитудой колебаний на его выходе. Определение постоянной времени интегрирования  $T_i$  по формуле (4) обеспечивается связью периода колебаний выходного сигнала объекта управления и его инерционности. Учет управляемости объекта заложен в соотношении его запаздывания  $\tau$  к постоянной времени  $T$ , поэтому при снижении степени его управляемости необходимо давать запас устойчивости системы в виде увеличения времени интегрирования.

Поиск настроек по такому принципу гарантирует получение желанного переходного процесса в несколько итераций. Метод не предназначен для объектов с соотношением  $\tau/T > 0.6$ , так как необходимы дополнительные условия для оптимизации параметров ПИ-регулятора.

Поиск оптимальных настроек ПИ-регулятора настроен на достижение прямых показателей качества переходного процесса – максимального динамического отклонения не более 10 % по каналу «задание-выход» и времени переходного процесса не более  $3^*(T+\tau)$ . Для иллюстрации работы системы выбран объект, динамика которого описывается аperiodическим звеном с запаздыванием, параметры которого:  $K=2$ ,  $T=150$ ,  $\tau=60$ . Величина входного возмущения на объект управления составляет 10 % от максимального значения. Начальная частота работы генератора гармонических сигналов – 0.02 Гц, амплитуда гармонического сигнала – 3 %. Величина сигнала задания составляет 10 единиц. Зона нечувствительности к рассогласованию сигналов составляет 5 % от значения задания измеряемой величины.

Результат первой фазы настройки (снятие выходного сигнала объекта управления при размыкании цепи обратной связи и подачи дополнительного гармонического сигнала на вход объекта) показан на рис. 3:

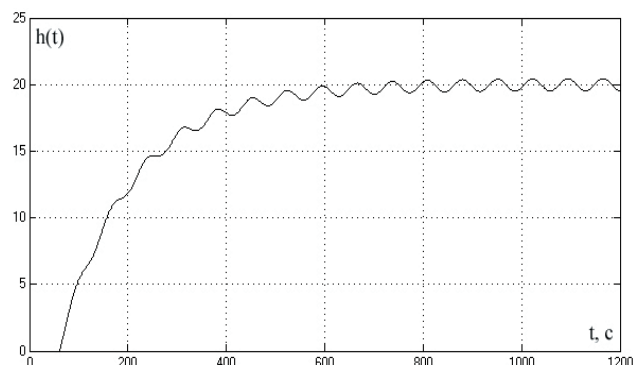


Рис. 3. Снятие сигнала с выхода объекта управления при подаче гармонического сигнала на вход

Аппроксимация объекта управления аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием методом прогнозирования погрешности оценки дала такой результат:

$$K_{РЕМ} = 2.01,$$

$$T_{РЕМ} = 154.62 \text{ с},$$

$$\tau_{РЕМ} = 59.14 \text{ с},$$

где  $K_{РЕМ}$ ,  $T_{РЕМ}$ ,  $\tau_{РЕМ}$ , - коэффициент передачи, постоянная времени и величина транспортного запаздывания объекта управления соответственно.

Полученные настройки ПИ-регулятора:

$$K_p = 0.47,$$

$$T_i = 86.5 \text{ с}.$$

При моделировании переходного процесса со стартовыми параметрами запуска процесса оптимизации переходной процесс имел неудовлетворительное время переходного процесса (710 с) и неудовлетворительное динамическое отклонение (13,9 %) (рис. 4–1).

Результат оптимизации настроек регулятора показан на рис. 4:

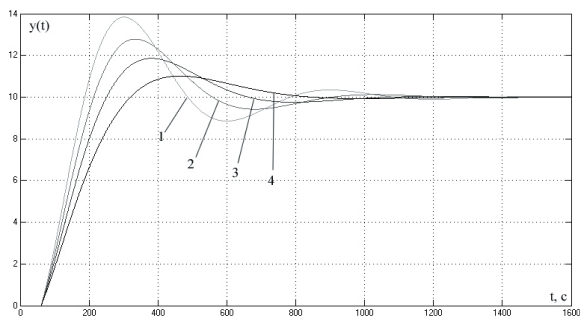


Рис. 4. Моделирование переходных процессов в замкнутой системе, где 1 — переходной процесс при первой итерации ( $\omega=0.02$  Гц), 2 — переходной процесс при второй итерации ( $\omega=0.018$  Гц), 3 — переходной процесс при третьей итерации ( $\omega=0.016$  Гц), 4 — переходной процесс при четвертой итерации ( $\omega=0.014$  Гц)

Поиск удовлетворительных настроек ПИ-регулятора выполнен за 4 итерации, при этом изменяемым параметром была частота колебаний входного гармонического сигнала  $\omega$ . Шаг изменения частоты – 0.002 Гц.

Оптимальный процесс получен при  $\omega=0.014$  Гц, так как динамическое отклонение составило 9,5 %, а время переходного процесса – 620 с. Итоговые настройки ПИ-регулятора:

$$K_p = 0.33,$$

$$T_i = 93 \text{ с}.$$

#### 4. Выводы

Предложенная адаптивная система автоматического управления позволяет реализовать качественное управление локальных одноконтурных систем управления при использовании современных управляющих и вычислительных средств автоматизации. Адаптация выполняется за счет подачи гармонического сигнала входного воздействия, идентификации объекта управления, расчета настроек регулятора и дальнейшей их оптимизации за счет моделирования переходных процессов в замкнутой системе в соответствующих вычислительных блоках до момента получения переходного процесса заданного качества, определяемого его прямыми показателями. Полученные формулы пересчета параметров переходного процесса в настройки регулятора позволяют обеспечить качественный переходной процесс удовлетворительного колебательного характера. Оптимизация настроек ПИ-регулятора по прямым показателям качества переходного процесса обеспечивает эффективную работу контуров в условиях практической эксплуатации оборудования.

#### Литература

1. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами [Текст]: уч. для вузов / В. Я. Ротач. – М.: Энергосамиздат, 1985. – 296 с.
2. Visioli, A. Practical PID-Control [Text] / A. Visioli. – Springer-Verlag London Limited, UK, 2006. – 322 p.
3. Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning [Text] : 2nd Edition / T. Hägglund, K. J. Åström. – Instrument Society of America, USA, 1995. – 352 p.
4. Теоретические основы построения эффективных АСУ ТП [Электронный ресурс] / ТулГУ, фак. кибернетики. – Режим доступа: [http://model.exponenta.ru/auto\\_reg.html/](http://model.exponenta.ru/auto_reg.html/). – 23.07.2002. – Загл. с экрана.
5. Goodwin, C. G. Control System Design [Text] / C. G. Goodwin, S. F. Graebe, M. E. Salgado. – Prentice Hall, USA, 2004. – 911 p.
6. Спицын, А. В. Исследование адаптивных регуляторов с частотной самонастройкой в среде Simulink [Текст] / А. В. Спицын, Л. Е. Кохановский, Б. Ю. Сорокин // Журнал «Известия ТулГУ». Технические Науки. – 2010. – № 2-2. – С. 153–161.
7. Спицын, А. В. Высококачественная адаптивная система управления с ПИ-регулятором [Текст] / А. В. Спицын, В. М. Мазуров // Журнал «Известия ТулГУ». Серия «Вычислительная техника, автоматика, управление». – 1998. – № 2. – С. 11–17.
8. Мовчан, А. П. Адаптивні та параметрично-оптимальні системи управління [Текст] : навч. посібник, ел. вид. / А. П. Мовчан, О. В. Степанець. – К. : КПІ, 2011. – 108 с.
9. Степанець, О. В. Адаптивні системи автоматичного керування для теплоенергетичних об'єктів [Текст] / О. В. Степанець, А. П. Мовчан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 11 (57). – С. 56–61.
10. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. [Text] :2nd Edition / A. O'Dwyer. – Imperial college press, Ireland, 2006. – 562 p.
11. EE 531 – System Identification [Electronic resources] / Chulalongkorn University, Department of Electrical Engineering. – Available at: <http://jitkomut.lecturer.eng.chula.ac.th/ee531/pem.pdf>, 2010.
12. Lecture Notes for a course on System Identification, v2012 [Electronic resources] / Uppsala University, Department of Information Technology. – Available at: <http://www.it.uu.se/edu/course/homepage/systemid/vt12/>, 2012.