

УДК 681.513.682

Методика инициализации беспоисковой самонастраивающейся автоматической системы регулирования

А.В. Кондрашин, В.С. Карасев
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kav@dsn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Проблема внедрения адаптивных систем автоматического управления остаётся достаточно актуальной, несмотря на значительное число работ в этой области. Не преодолен разрыв между теорией и практикой. Слабо освещаются вопросы практического внедрения адаптивных алгоритмов, в максимальной степени ориентированных на возможности современных промышленных контроллеров.

Материалы и методы: Применены инструментальные средства разработки и отладки прикладного программного обеспечения промышленных программно-технических комплексов отечественной фирмы «Текон».

Результаты: Выполнена систематизация параметров алгоритма адаптивного контроллера, разработана и опробована процедура обоснования значений этих параметров. Предложен подход к решению задач настройки параметрических контуров адаптивной системы, позволяющий применять классические методы теории систем регулирования.

Выводы: Предложенный подход обеспечивает условия для эффективного функционирования адаптивной системы управления теплотехническими процессами.

Ключевые слова: адаптивная система, параметрическая подстройка, беспоисковая самонастраивающаяся система, настройка адаптивной системы, оценка свойств объекта.

Initialization Methods of Searchless Self-tune Automatic Regulation System

A.V. Kondrashin, V.S. Karasyov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: kav@dsn.ru

Abstract

Background: The implementation problem of adaptive systems of automatic control remains quite urgent despite on the fact that the significant number of works are done in this field. The gap between theory and practice is not overcome. The issues of practical implementation of adaptive algorithms, which are focused on the opportunity of modern industrial controllers, are badly considered.

Materials and methods: The authors apply the instrumental tools of development and adjustment of the applied software for industrial hardware and software complexes of «TECON» Russian company.

Results: Systematization of the parameters of adaptive controller algorithm is developed and the justification procedure of values of these parameters is tested. The approach to solve the tasks of setting the parametric circuits of adaptive system, allowing to use classic methods of the theory of control systems is proposed.

Conclusions: The given approach provides conditions for effective functioning of the adaptive control system of the heat-energy processes.

Key words: adaptive control, parametric adjustment, Searchless self-tune system, adaptive system turning, estimation of object characteristics.

Одним из главных путей повышения качества работы промышленных автоматических систем регулирования (АСР) является разработка и внедрение адаптивных регуляторов, параметры или даже структура которых при изменении внешних условий автоматически изменяются, поддерживая тем самым близкий к оптимальному режим работы. Достаточно полную классификацию и обстоятельный обзор таких систем можно найти в [1, 2, 3].

Специфика адаптивной автоматической системы регулирования (ААСР), представленной в [4, 5], порождает нехарактерные для наладки таких систем процедуры, требующие понимания их сути. Прежде всего это обусловлено тем, что одноконтурная АСР, соот-

ветствующая классу одномерных систем, фактически становится многомерной (трехмерной). Теперь вектор управляемых переменных (рис. 1) включает не только y – основную координату системы (объекта управления), но и два вычисляемых параметра ошибки управления как случайного процесса $\varepsilon(t)$ – среднюю частоту $\omega_{cp}(t)$ и характеристику затухания корреляционной функции $\alpha(t)$, косвенно связанную с параметром $\psi(t)$, отвечающим за запас устойчивости АСР. Управляющими воздействиями для них являются:

- μ – положение регулирующего органа;
- k_p – коэффициент усиления регулятора;
- T_i – постоянная интегрирования регулятора.

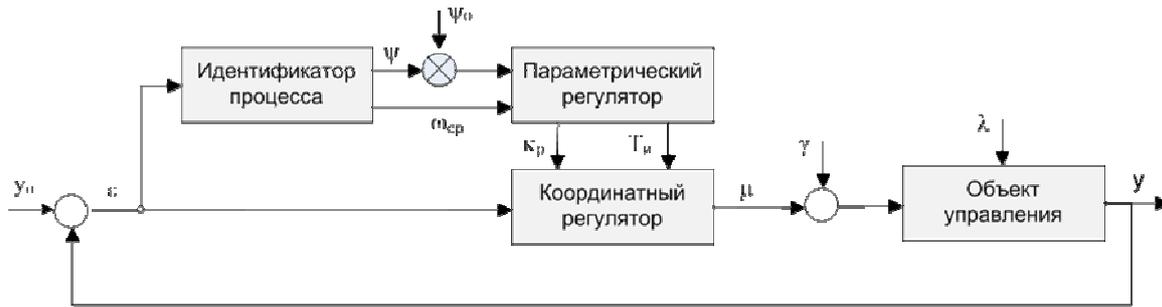


Рис. 1. Структурная схема системы с адаптивным ПИ-регулятором

И если в работе [4] основное внимание уделяется сущности связи динамических свойств объекта управления с вновь введенными характеристиками ω_{cp} и $\alpha(\psi)$, то мы сконцентрируемся на реализуемости алгоритмов параметрического управления и на некоторых процедурных обстоятельствах, сопутствующих внедрению адаптивной системы.

Во избежание наложения резонансных явлений, характерных для замкнутых систем, требуется, прежде всего, принять концептуальное решение о частотном размежевании контуров. Для этого следует принять во внимание те технологические особенности [5], которые явились обоснованием возможности применения обсуждаемого здесь варианта ААСР, а именно:

1) синхронность изменения всех связанных между собой теплофизических процессов под влиянием внешних или внутренних факторов;

2) относительную инерционность теплофизических процессов;

3) предопределенность нелинейного характера статических свойств объекта управления не только режимными, но и конструктивными факторами, прежде всего связанными с характеристиками регулирующих органов.

Это позволяет распределить задачи, реализуемые контурами управления, по степени снижения быстродействия следующим образом:

- координатный контур

$$K_1 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \mu \rightarrow u;$$

- параметрический контур

$$K_2 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha \rightarrow k_p \rightarrow \mu \rightarrow u;$$

- параметрический контур

$$K_3 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \omega_{cp} \rightarrow T_i \rightarrow \mu \rightarrow u.$$

Все характерные для K_1 обстоятельства достаточно хорошо изучены и могут быть должным образом использованы в процессе начальной настройки алгоритма регулятора R_1 в одноконтурной АСР. При этом должны быть учтены все необходимые технологические требования T_ε к качеству управления. Результатами оптимизации K_1 , т.е. проекции T_ε на параметры ПИ¹-алгоритма при фиксированных начальных (базовых) свойствах объекта управления W_0 , являются не только опти-

мальные (базовые) значения параметров k_{p0} и T_{i0} , но и значения показателей $(\omega_{cp})_0$ и α_0 , оценивающих свойства основного процесса $\varepsilon(t)$:

$$R_1^{(0)} : T_\varepsilon \rightarrow \begin{Bmatrix} k_p^{(0)} \\ T_i^{(0)} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} \alpha^{(0)} \\ \omega_{cp}^{(0)} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Алгоритм управления, реализуемый в контуре K_2 , призван обеспечить стабилизацию заданного запаса устойчивости, оцениваемого значением косвенного показателя α , на уровне $\alpha^{(0)}$. В качестве алгоритма регулятора R_2 принято решение использовать П-закон. Это объясняется желанием иметь относительно высокое быстродействие. Характерный для такого алгоритма статизм не имеет принципиального значения, так как может быть нейтрализован системой третьего уровня. Неотъемлемой частью функций R_2 является online-оценивание косвенного показателя запаса устойчивости α на основе обработки ограниченных по длине реализаций случайного процесса:

$$E_2 = \{\varepsilon_i\}, \forall i \in [1, N_2]. \quad (2)$$

Принципиальное значение имеет и шаг квантования T_{02} , влияющий на длительность накопления данных в буфере программы. На рис. 2 представлена схема организации расчета, целью которого является оценивание параметра α , являющегося косвенным показателем запаса устойчивости системы. Накопленный массив исходных данных E_2 проходит через фильтр Φ_2 с целью удаления малоинформативной информации на частотах, не имеющих отношения к решению задач в контуре K_2 . При этом размер нового массива \hat{E}_2 уменьшается на ширину фильтра, равную n_2 . В конечном счете искомая оценка параметра α сдвигается по отношению к входному процессу $\varepsilon(k)$ на $N_2 + n_2$ тактов, что эквивалентно появлению в контуре K_2 запаздывания

$$\tau_2 = (N_2 + n_2) T_{02}. \quad (3)$$

¹Нет препятствий к применению и ПИД-алгоритма

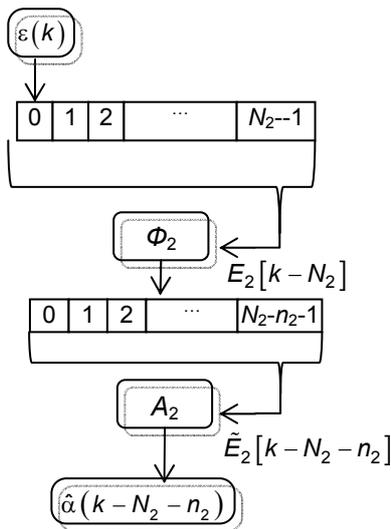


Рис. 2. Схема организации online-оценивания параметра α

Результатом этого становится динамическая ошибка оценки, фрагмент зависимости которой от относительной частоты $\omega\tau$ представлен на рис. 3.

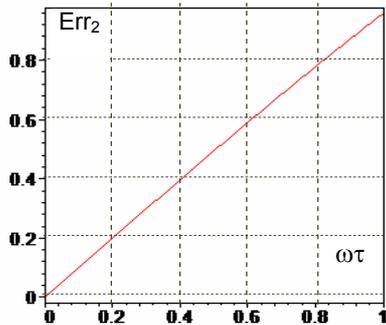


Рис. 3. Относительная динамическая ошибка оценки α

В частности, при $T_{02} = 100$ мс и суммарной длине буферных массивов $N_2+n_2 = 256+32 = 288$ время запаздывания составит около 0,5 мин. Допуская динамическую ошибку в 10 %, получаем возможность определить граничные условия эффективной работы контура K_2 :

$$\omega_{\max} = 0,1/0,5 = 0,2 \text{ рад/мин},$$

что соответствует минимальному периоду параметрических колебаний

$$T_{\max} = 2\pi/0,2 = 31,4 \text{ мин} \approx 0,5 \text{ ч}.$$

Следует отметить, что для более полной оценки влияния параметров алгоритмов Φ_2 и A_2 на точность управления необходимо исходить не только из общего алгоритма регулятора

$$R_2 : \begin{cases} \Phi_2 \quad A_2 \quad B_2 \\ E_2(t) \rightarrow \hat{E}_2(t) \rightarrow \hat{\alpha}(t) \rightarrow M_{kp}(t), \\ B_2 : M_{kp}(t) = 1 + k_2 [\hat{\alpha}(t) - \alpha^{(0)}], \\ k_p(t) = M_{kp}(t) \cdot k_p^{(0)}, \end{cases} \quad (4)$$

но и из зависимости запаса устойчивости системы (в формате эквивалентной² степени затухания переходных процессов ψ) от коэффициента усиления регулятора R_1 (рис. 4).

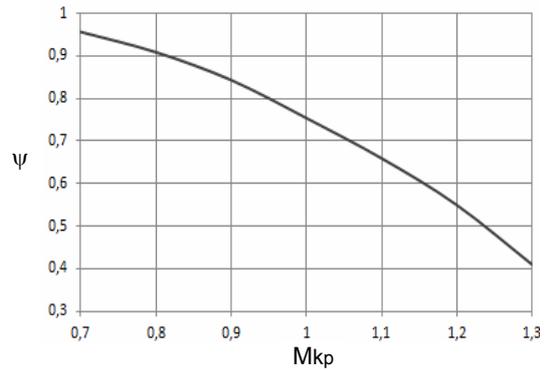


Рис. 4. Зависимость эквивалентной степени затухания процессов в системе от масштаба коэффициента усиления ПИ-регулятора (пример для $\tau/T = 0,1$)

Параметрами R_2 являются:

- типы фильтров Φ_2 и A_2 ;
- размеры буферных массивов N_2 и n_2 ;
- коэффициент усиления k_2 .

Изложенное для контура K_2 в полной мере может быть отнесено и к контуру K_3 . Для краткости не будем воспроизводить все рисунки и формулы, ограничившись лишь перечислением основных online-алгоритмов фильтрации (Φ_3) и оценивания средней частоты процесса (A_3), а также самого параметрического регулятора

$$R_3 : \begin{cases} \Phi_3 \quad A_3 \quad B_3 \\ E_3(t) \rightarrow \hat{E}_3(t) \rightarrow \omega_{cp}(t) \rightarrow M_{Ti}(t), \\ B_3 : M_{Ti}(t) = k_3 \int_0^t [\omega_{cp}(\varphi) - \omega_{cp}^{(0)}] d\varphi, \\ T_i(t) = M_{Ti}(t) \cdot T_i^{(0)}. \end{cases} \quad (5)$$

Существенным отличием контура K_3 является решение, направленное на упоминавшееся выше размежевание резонансных частот контуров и заключающееся в выборе И-алгоритма B_3 , обладающего пониженной рабочей частотой и астатическим качеством управления.

²Термин «эквивалентная» использован в связи с тем, что в реальной системе, работающей в классе случайных процессов, нет возможности явным образом оценить степень затухания процесса ψ и приходится прибегать к косвенным способам ее оценки.

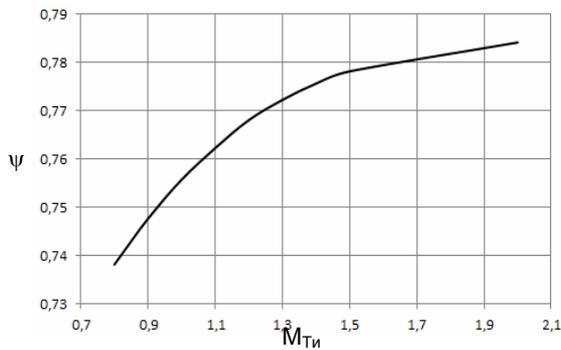


Рис. 5. Зависимость эквивалентной степени затухания процессов в системе от масштаба постоянной интегрирования ПИ-регулятора (пример для $\tau/T = 0,1$)

- Параметрами регулятора R_3 являются:
- типы фильтров Φ_3 и A_3 ;
 - размеры буферных массивов N_3 и n_3 ;
 - коэффициент усиления k_3 .

Методикой настройки ААСР предусматривается выполнение трех шагов, обеспечивающих последовательную оптимизацию регуляторов R_1 , R_2 и R_3 . При обосновании значений параметров алгоритмов B_1 , B_2 и B_3 используются традиционные для теории АСР методы, основанные на частотном анализе систем. Применим подобный подход и для обоснования алгоритмов Φ и A , переходя к оценке их свойств с помощью комплексных частотных характеристик.

Рис. 6 иллюстрируют роль фильтров высоких частот.

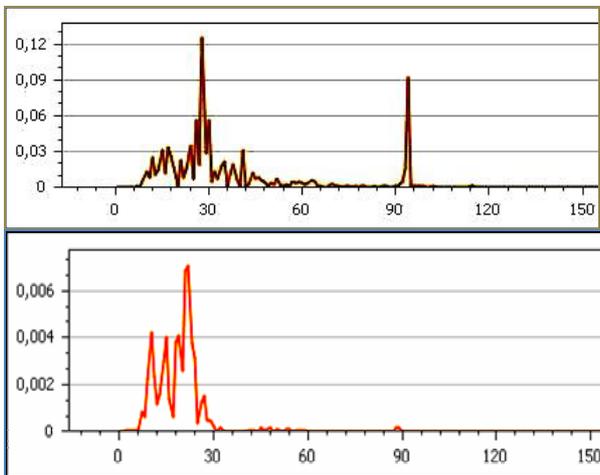


Рис. 6. Пример фильтрации процесса прямоугольным окном (спектральные плотности мощности до и после фильтрации)

На рис. 7, 8 в качестве примера приведены результаты исследования на расчетной модели алгоритма фильтрации Φ . В качестве базовой частоты, позволяющей нормировать результаты расчета, принята частота входного процесса $\omega = 1$ рад/с. Это дает возможность легко пересчитать характеристики для любого значения частоты при сохранении относительной величины шага T_0 .

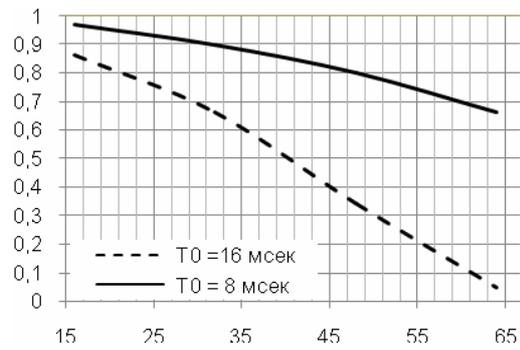


Рис. 7. Пример зависимости АЧХ на частоте $\omega = 1$ рад/с от ширины окна и относительного шага квантования T_0

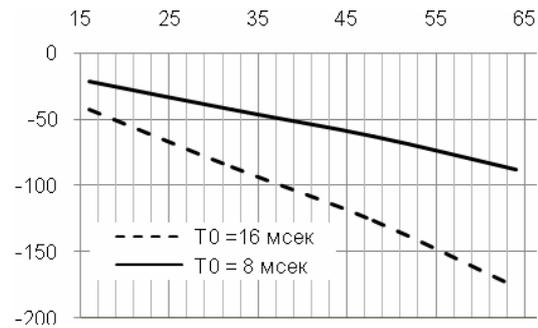


Рис. 8. Пример зависимости ФЧХ на частоте $\omega = 1$ рад/с от ширины окна и относительного шага квантования T_0

Анализ ФЧХ полностью подтверждает свойство, описанное соотношением (3). А вот характер поведения АЧХ, который ранее не обсуждался, свидетельствует о нелинейной зависимости свойств алгоритма Φ от ширины окна фильтрации n . Это побуждает нас искать решение задачи в классе методов статистической или гармонической линеаризации.

Актуальность такого подхода иллюстрируется двумя примерами функционирования ААСР на модели при имитации параметрических изменений в объекте по гармоническому закону.

В случае, изображенном на рис. 9, наблюдается соответствие переходных процессов в параметрическом контуре характеру параметрических изменений в объекте (синусоида). Вполне закономерно некоторое смещение процессов во времени и масштабированность параметрической реакции системы.

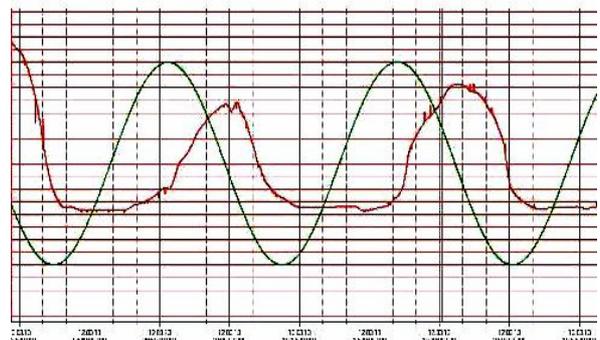


Рис. 9. Пример согласованной работы системы (тренды изменения динамики объекта и реакции адаптивной системы)

Вариант же на рис. 10 иллюстрирует срыв работы параметрического контура, выводящий параметрическую коррекцию в противофазу в зоне нижних экстремумов синусоиды. Этот эффект продемонстрирован для предупреждения возможности невнимательного отношения к обоснованию параметров алгоритмов первичной обработки данных в буферных массивах алгоритмов регуляторов R_2 и R_3 . При этом стоит заметить и положительный эффект – самоустранение проблемы при выходе в зону допустимых значений параметрического фактора.

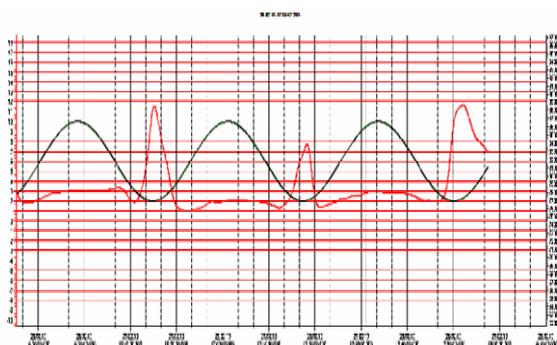


Рис. 10. Пример работы системы в противофазе (тенденция изменения динамики объекта и реакции адаптивной системы)

Нами предложены практические решения, обеспечивающие все основные процедуры выбора параметров параметрических контуров.

Заключение

Представленная задача настройки беспойсковой ААСР использует для параметрической коррекции регулятора свойства сигнала по ошибке управления. Методы настройки

Кондрашин Анатолий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов,
e-mail: kav@dsn.ru

Карасев Виктор Сергеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
e-mail: karvik1987@mail.ru

и наиболее характерные специфические особенности системы должны учитываться при настройке системы.

Список литературы

1. Ротач В.Я., Ключев А.С. Автоматизация настройки систем управления / под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
2. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. – СПб.: ЛКИ, 2008. – 384 с.
3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74; 2007. – № 1. – С. 78–88.
4. Кондрашин А.В., Карасев В.С. Реализация беспойсковой самонастраивающейся системы автоматического управления // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1. – С. 1–5.
5. Кондрашин А.В. Беспойсковые самонастраивающиеся системы автоматического управления и перспективы их применения в теплоэнергетике // «Автоматизация производства»: сб. тр. – М.: 2001. – № 4. – С.1–10.

References

1. Rotach, V.Ya., Klyuev, A.S. *Avtomatizatsiya nastroyki sistem upravleniya* [Automation of Control Systems Turning]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 272 p.
2. Tyukin, I.Yu., Terekhov, V.A. *Adaptatsiya v nelineynykh dinamicheskikh sistemakh* [Adaptation in Nonlinear Dynamic Systems]. Saint-Petersburg: LKI, 2008. 384 p.
3. Denisenko, V.V. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2006, 4, pp. 66–74; 2007, 1, pp. 78–88.
4. Kondrashin, A.V. Karasev, V.S. *Realizatsiya bespoiskovoy samonastrayayushcheyasya sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Implementation of Searchless Self-tuning System of Automatic Control]. *Vestnik IGEU*, 2012, no. 1, pp. 1–5.
5. Kondrashin, A.V. *Bespoiskovye samonastrayayushchiesya sistemy avtomaticheskogo upravleniya i perspektivy ikh primeneniya v teploenergetike* [Searchless Self-tuning Systems of Automatic Control and the Prospects of their Application in Heat Power Engineering]. *Sbornik «Avtomatizatsiya proizvodstva»* [Automation of Industry]. Moscow, 2001, no. 4, pp.1–10.