

А.В. Кондрашин, В.С. Карасёв

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Представлены концептуальные положения, определяющие специфику задачи функциональной диагностики одного класса беспоисковых адаптивных автоматических систем регулирования, отличающихся применением косвенных показателей, вычисляемых по ошибке управления в режиме реального времени. Актуальность задачи порождена повышенными требованиями, предъявляемые сложным технологическим объектом управления. Вводится понятие области функциональной работоспособности, учитывающей риски ухудшения качества адаптивного управления. Решение задачи позволило дополнить функции адаптивной системы функцией самодиагностики, обладающей способностью мягкого ослабления адаптирующих эффектов при приближении к пороговым значениям диагностирующих показателей. В основе решения лежит применение лингвистической переменной, оценивающей многообразие функциональных состояний системы. Описываются технические решения, использованные в эксплуатируемой адаптивной системе управления температурой перегретого пара крупного энергетического котла. Каждому характерному функциональному состоянию поставлено в соответствие управляющее действие, снижающее или исключаящее эффект влияния риска на качество управления. Для повышения качества управления в условиях непрогнозируемых изменений режимных факторов, существенно влияющих на динамические характеристики объекта управления, предложено использовать компромиссное решение, сочетающее адаптивную подстройку параметров регулятора с подстройкой на основе заранее подготовленной таблицы решений, учитывающей значение ведущего режимного фактора – нагрузки парового котла. Все технические решения ориентированы на применение современных микропроцессорных систем управления, обеспечивающих возможность решения множества функциональных задач в режиме реального времени. Достижимая функциональная гибкость системы управления позволяет рассчитывать на её эффективное применение в условиях с разным уровнем квалификации наладчиков и обслуживающего персонала.

Беспоисковая адаптивная система; функциональная диагностика; лингвистическая переменная; область функциональной работоспособности; микропроцессорная система управления.

A.V. Kondrashin, V.S. Karasev

FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM: STATEMENT OF THE PROBLEM AND ITS SOLUTION

Presented are the conceptual provisions which define the specific tasks of functional diagnostics of one class of searchless adaptive control systems characterized by the use of indirect indicators which are calculated from the real-time error control. The urgency of the problem is caused by the elevated requirements of complex technological object of control. Introduced is the concept of functional performance area which takes into account the risks of deterioration of adaptive control. The solution of the problem made it possible to supplement the functions of an adaptive system with the self-diagnostic function having the ability of mild attenuation of the adapting effects when approaching the threshold values of diagnostic indicators. The solution is based on the use of the linguistic variable assessing the diversity of functional states of the system. Described are the technical solutions used in the existing adaptive system of control of the superheated steam temperature in large power boiler. Each typical functional state corresponds to the action of control, which reduces or eliminates the effect of risk on the quality control. To increase the quality of control in the context of unpredictable changes in operation factors which significantly affect the dynamic characteristics of the control object, it is proposed to use a compromise solution, which combines the adaptive tuning of the controller parameters and the tuning based on

pre-prepared table of solutions, taking into account the value of the leading operation factor, the steam boiler load. All technical solutions are focused on application of modern microprocessor control systems providing the capability of solving many functional tasks in real-time. The achieved functional flexibility of the control system allows expecting its effective application in conditions of different level of adjusters' professional skills.

Searchless adaptive system; functional diagnostics; linguistic variable; functional performance area; microprocessor control system.

Введение. Естественные направления развития промышленных алгоритмов управления технологическими процессами, инициированные переходом на современную микропроцессорную технику, отличаются прежде всего поиском решений, обеспечивающих:

- 1) повышение качества автоматического управления;
- 2) расширение области функционирования автоматических систем регулирования (АСР) при выполнении технологических требований к качеству управления;
- 3) снижение трудозатрат на разработку и внедрение промышленных версий систем.

Именно эти обстоятельства лежат в основе создания и внедрения востребованных практикой адаптивных автоматических систем регулирования (ААСР) технологическими объектами [1, 2]. Подтверждением этого являются ААСР, предназначенные для управления теплоэнергетическими объектами и представленные в авторских работах [3–5]. Опытная эксплуатация таких ААСР, отличающихся повышенной сложностью алгоритмов, выявила актуальность ещё одного направления их развития – функциональной самодиагностики.

Постановка задачи. Применение в автоматической системе регулирования дополнительных параметрических контуров, призванных обеспечивать подстройку параметров регулятора и иных элементов автоматики под текущие особенности объекта управления, порождает риск конфликта координатного и параметрического управлений [4]. Чаще всего это проявляется при сближении резонансных частот, характерных для многоконтурной системы.

Анализ рисков, характерных для системы управления, функционирующей в условиях непрогнозируемых изменений свойств объекта, позволяет предложить решения, не только защищающие систему от нежелательного развития событий, но и повышающие её эксплуатационные показатели эффективности.

Концептуальные особенности предлагаемого подхода. Будем исходить из того, что:

- 1) Существует объективное множество технологических (внешних) факторов,

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

оказывающих влияние на динамические свойства сложного объекта управления и на специфику действующих в объекте возмущений [7, 8].

- 2) В ААСР для оперативной оценки происходящих в объекте управления изменений используются косвенные показатели

$$\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}, \quad (2)$$

зависимые от значений векторов влияющих факторов \mathbf{A}

$$\varphi_i : \vec{a}_i \rightarrow b_i, \quad \forall \vec{a}_i \in D_{A_i}. \quad (3)$$

- 3) Параметры \mathbf{C} , характеризующие свойства алгоритмов управляющих компонентов (регуляторов, компенсаторов, корректоров и т.п.) ААСР

$$\mathbf{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, \quad (4)$$

тем или иным способом связываются с подмножеством показателей $B_j \subseteq B$, образующим вектор \mathbf{b}

$$\psi_j : \vec{b}_j \rightarrow c_j, \forall \vec{b}_j \in D_{B_j} \quad (5)$$

при естественном ограничении на область определения функции ψ_j , зависящем от механизма реализации принципа адаптивного управления.

4) Схема отношений элементов множеств A , B и C , представленная на рис. 1, обобщает и визуализирует исходные предпосылки, лежащие в основе задачи самодиагностики функционирования ААСР.

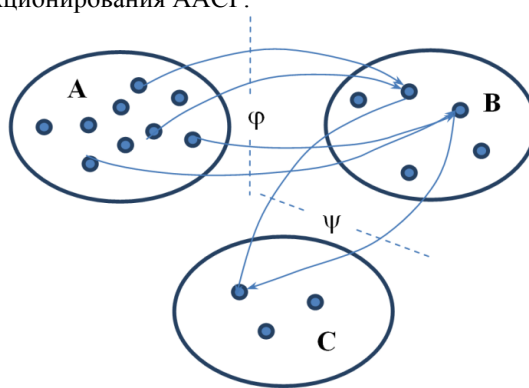


Рис. 1. Отношения переменных в рассматриваемой задаче адаптивного управления

5) Сущность проблемы, которая может проявить себя в процессе функционирования ААСР, связана с рядом обстоятельств, среди которых в соответствии с [9–12]:

- ◆ неполная информированность разработчиков ААСР об элементах множества A , включая как состав, так и область значений;
- ◆ субъективность выбора методов косвенной оценки параметров B , с ограниченной точности и области определения расчётных алгоритмов;
- ◆ субъективность выбора способов и алгоритмов реализации адаптивной подстройки параметров C в режиме реального времени;
- ◆ качество настройки (оптимизации) параметрических контуров управления и сопутствующей этой настройке процедуре инициализации АСАУ. В частности, в работе [5], описывавшей методику инициализации системы, показаны характерные процессы, отражающие эффект выбора ширины окна цифрового фильтра и свидетельствующие о возможной причине функционального отказа адаптивной системы. В процессе работы оборудования изменяются не только свойства объекта управления, но и характеристики действующих на этот объект возмущений. И вполне вероятным может быть ФО, вызванный смещением значения ширины окна фильтрации.

6) Совокупность обстоятельств, перечисленных в п 5, может приводить к эффекту, характерному для функционального отказа (ФО) ААСР.

7) Вполне естественной является возможность диагностирования ФО по параметру, отвечающему за качество управления. На рис. 2, иллюстрирующем толкование ФО на однофакторном примере, в качестве такого диагностирующего параметра показана ошибка управления (рассогласование) ε .

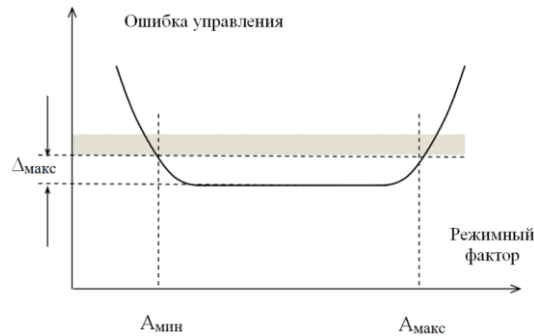


Рис. 2. Сущность определения области функциональной работоспособности САУ

Однако для целей диагностики, ориентированной не только на фиксацию ФО, но и на выявление его причины, прямого наблюдения за ошибкой управления недостаточно. В общем случае для полноценной диагностики ФО следует использовать показатели \mathbf{G} , оцениваемые с помощью специальных функций на основе информации, в конечном счёте основанной на сигнале рассогласования¹

$$\mathbf{G}(\varepsilon) = \{\alpha(\varepsilon), \beta(\varepsilon), \dots\}, \quad (6)$$

Количество таких показателей n (размер множества \mathbf{G}) должно отвечать разрешающей способности системы диагностики, т.е. количеству характерных функциональных состояний системы N :

$$v(\mathbf{G}) = n \geq N. \quad (7)$$

В работе [13] подобная характеристика названа степенью диагностируемости системы. Условие (7) необходимо дополнить требованием обособленности диагностических показателей \mathbf{G} , исключающей их применение в контурах адаптивной настройки параметров элементов автоматики.

8) Функциональная диагностика должна выполняться для системы в целом, а не только для её адаптирующих компонентов (параметрических контуров).

9) Принципиальным решением, предотвращающим возникновение ФО, вызванного неадекватным действием параметрических контуров, является возможность мягкого ослабления адаптирующих эффектов, при приближении к пороговому значению Δ_{\max} некоторого показателя качества работы. Полное отключение параметрических контуров происходит при превышении порогового значения наблюдаемого диагностического параметра.

10) Наряду с совершенствованием самих адаптивных алгоритмов (см., например, [2, 14, 15]) в последние годы существенно возрос интерес и к задачам функциональной диагностики сложных динамических систем. Это объясняется возможностями современных компьютерных систем реального времени, обладающих способностью реализации достаточно сложных диагностических алгоритмов [16–22].

11) Наиболее перспективно для оценки работоспособности ААСР использовать лингвистическую переменную (ЛП) \mathbf{S} , формируемую с помощью методов нечёткой математики [23–27]. Значениями диагностического лингвистического параметра \mathbf{S} , который, к примеру, назовём «Функциональное состояние (ФС)», должны быть характерные состояния системы. Примерами таких состояний могут быть «норма», «предел 1», «предел 2», «критическое состояние» и т.п. Таким образом, процесс оценки значения параметра \mathbf{S} фактически сводится к задаче распознавания ситуаций.

¹Это связано со спецификой ААСР, предложенной авторами работы.

12) Число значений ЛП S определяется числом распознаваемых диагностических ситуаций N , для каждой из которых может быть предусмотрено наиболее рациональное диагностическое управление (ДУ) U , минимизирующее технологический риск управления.

13) Формально этот процесс можно описать в виде корректирующего воздействия U диагностической подсистемы ААСР на значения параметров алгоритмов управляющих элементов C (рис. 3). Вследствие того, что функция диагностики встроена в общий алгоритм работы ААСР, отнесём решаемую ей задачу к самодиагностике ААСР.

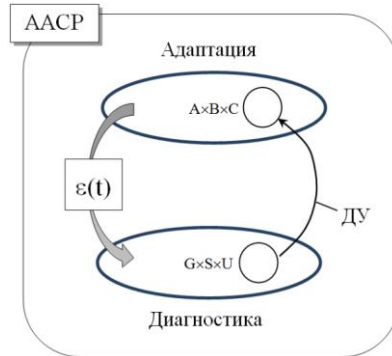


Рис. 3. Схема связи переменных в задаче функциональной самодиагностики ААСР

Особенности технического решения. В основе решения лежит ААСР, описанная в [4, 5] и реализованная в виде автоматической системы управления температурой перегретого пара энергетического котла. С учётом эксплуатационного опыта выделено 5 характерных функциональных состояний, определяющих значение лингвистической переменной S и представленных в табл. 1.

Ситуация S_1 не требует комментариев, т.к. соответствует системе, в полной мере реализующей предписанные функции управления.

В ситуации S_2 предусматривается мягкое ограничение коэффициентов усиления параметрических контуров, отвечающих за управление коэффициентом усиления регулятора k и постоянной интегрирования T :

Таблица 1

Функциональные диагностические события

№	Значение ЛП (S)	Ситуационные признаки	Действие (U)
1	$S_1 = H =$ <Норма>	Отсутствуют	U_1 – Не требуется
2	$S_2 = K =$ <Колебания>	Размах параметрических колебаний выше нормы	U_2 – Ослабление влияния параметрического контура на координатный
3	$S_3 = O =$ <Ограничение хода>	Перемещение исполнительного механизма на границу допустимых состояний	U_3 – Блокирование работы основного регулятора в соответствующем направлении и ослабление влияния параметрического контура
4	$S_4 = \Pi =$ <Переброс>	Постоянное переключение выхода регулятора «Больше – Меньше»	U_4 – Уменьшение значения коэффициента усиления технологического регулятора
5	$S_5 = \Gamma =$ <Граница адаптации>	Выход значений параметров настройки основного регулятора за уставки	U_5 – Срабатывание сигнализации (операторский интерфейс) и запись события в журнал архивной станции

$$\left. \begin{aligned} k_k &= k_a \cdot \alpha_k \\ k_T &= T_a \cdot \alpha_T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь индекс «а» соответствует значениям параметров настройки, формируемым с помощью AS, а α – коэффициент ослабления адаптивного эффекта. Его значение находится с учётом назначенных границ своих значений:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta \leq \theta_{\min}; \\ \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\min} - \theta_{\min}}, & \text{при } \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}; \\ 1, & \text{при } \theta \geq \theta_{\min}. \end{cases} \quad (9)$$

Из свойств функции (9) следует, что действие DS направлено на ослабление или полное отключение адаптирующего эффекта в соответствии с текущим значением диагностирующего параметра θ .

Ситуация S_3 необходима для устранения возможной попытки параметрического контура необоснованно увеличить значение подчинённого ему параметра, т.к. истинная причина фактического бездействия регулятора порождена выходом исполнительного механизма на свою границу допустимых состояний (на ограничители). Мягкость управляющего эффекта позволит по мере приближения к границе (к ограничителям хода) ослабить адаптирующий эффект параметрического управления и фактически подготовить соответствующий контур адаптации к безударному отключению. По мере восстановления нормального режима реализуется процедура безударного включения контура адаптации.

Ситуация S_4 может быть обусловлена выходом значения адаптируемого параметра регулятора за границу технического допуска, приводящего в данном случае к перебегающему реверсу хода исполнительного механизма, к так называемому эффекту «переброса». Чаще всего это возникает в нелинейных блоках реального промышленного регулятора в результате выхода внутреннего параметра за границы так называемой области нормальных режимов. Способы выхода из подобного состояния обычно хорошо проработаны и требуют лишь своевременной диагностики.

Ситуация S_5 вполне вероятна, т.к. в процессе наладки адаптирующих контуров управления могут быть выставлены технические ограничения на значения корректирующих коэффициентов. В таком случае регистрация (архивация) события позволит службе сопровождения в дальнейшем учесть факты выхода за уставки и использовать информацию для совершенствования алгоритмов ААСР.

На рис. 4 представлена схема, в которой наряду с объектом управления (ControlObject – CO) представлены все подсистемы, а именно:

- ◆ CS – подсистема координатного управления (ControlSystem);
- ◆ AS – подсистема адаптации (Adaptive System);
- ◆ DS – диагностическая подсистема (DiagnosticSystem).

Наряду с ними показана и U-таблица, соответствующая табл. 1 и определяющая действия DS. В эту таблицу уместно поместить и так называемые «значения параметров по умолчанию», соответствующие параметрам обычной (не адаптивной) системы управления.

Заслуживает внимания и компромиссный вариант системы, сочетающей в себе возможности обычной и адаптивной систем.

Для обычной системы можно предусмотреть автоматическую подстройку параметров элементов автоматики по так называемому ведущему фактору $L(t)$. В теплоэнергетике это обычно нагрузка – производительность агрегатов. На рис. 4 учёт такого фактора выражен пунктирной линией.

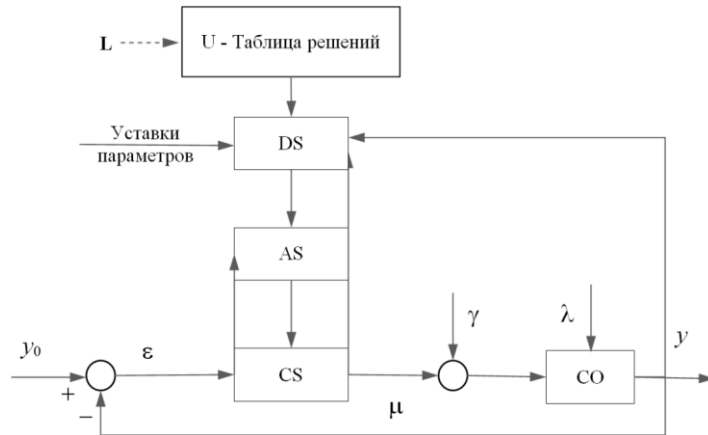


Рис. 4. Общая схема адаптивной АСР с функцией самодиагностики

В прогнозируемых условиях подобная система может успешно подстраивать параметры регулятора и других элементов автоматики на основе заранее просчитанных таблиц или predetermined на стадии внедрения функций

$$C(t) = U[L(t)]. \quad (10)$$

В таком случае встроенная DS может работать в режиме мониторинга параметрических воздействий, фактически выполняя одну из диагностических задач. При обнаружении значимых нарушений, обусловленных развитием событий, не предусмотренных готовой таблицей решений, DS имеет возможность автоматического подключения блока AS, перевода АСР в ААСР.

Достоинства такого компромиссного варианта очевидны:

- 1) в максимальной степени используется априорная информация;
- 2) при работе по таблицам устраняются параметрические контуры;
- 3) повышается надёжность системы (за счёт отключения функции AS на множестве состояний, гарантирующих эффективную коррекцию параметров CS по таблице решений U);
- 4) в условиях отсутствия квалифицированных специалистов по настройке адаптивных систем можно заблокировать работу подсистемы AS. Решение о количестве и перечне активных функций в DS может приниматься с учётом складывающейся кадровой ситуации.

Заключение. Поставлена актуальная задача самодиагностики одного класса беспилотных адаптивных систем регулирования. Практическая значимость встраиваемой подсистемы функциональной диагностики усиливается в случае дополнения её возможностей задачей мониторинга автоматической системы регулирования. Это обеспечивает возможность создания и применения АСР с конфигурируемым перечнем функциональных задач.

Внедрение таких АСР с встроенными подсистемами адаптации и самодиагностики существенно расширяет функциональные возможности систем и уменьшает технологический риск, связанный с несовершенством алгоритмов управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паршева Е.А. Децентрализованное адаптивное управление по выходу многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 5. – С. 14-22.
2. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Эволюция и проблемы теории адаптивных систем управления. Ч. I // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 6. – С. 9-18.

3. *Кондрашин А.В.* Беспорисковые самонастраивающиеся системы автоматического управления и перспективы их применения в теплоэнергетике // Сб. трудов «Автоматизация производства». – М., 2001. – № 4. – С.1-10.
4. *Карасев В.С., Кондрашин А.В.* Реализация беспорисковой самонастраивающейся системы автоматического управления // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1.
5. *Карасев В.С., Кондрашин А.В.* Методика инициализации беспорисковой самонастраивающейся системы автоматического управления // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 3. – С. 18-22.
6. *Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Ключев А.С.* и др. Автоматизация настройки систем управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
7. *Кондрашин А.В.* Технологические основы управления теплоэнергетическим оборудованием. – М.: Изд-во «ИСПО-Сервис», 2004. – 317 с.
8. *Корецкий А.С., Ринкус Э.К., Остер-Миллер Ю.Р.* и др. Эффективность АСУ теплоэнергетическими процессами / под ред. А.С. Корецкого, Э.К. Ринкуса. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 316 с.
9. *Bastin G., Gevers M.* Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1988. – Vol. 33, no. 7. – P. 650-658.
10. *Bastin G., Bitmead R., Campion G., Gevers M.* Identification of linearly overparametrized nonlinear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1992. – Vol. 37, no. 7. – P. 1073-1078.
11. *Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.* Nonlinear and Adaptive Control Design. – Wiley and Sons Inc., 1995. – 563 p.
12. *Krstic M., Wang H.-H.* Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 595-601.
13. *Микеладзе М.А.* Развитие основных моделей самодиагностирования сложных технических систем // Автоматика и телемеханика. – 1995. – № 5. – С. 3-18.
14. *Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y.* Patents, soft_ware, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb.2006. – P. 41-54.
15. *Красовский А.А.* Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией // Современная прикладная теория управления (в 3-х частях). Ч. I. «Оптимизационный подход в теории управления» / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – С. 268-311.
16. *Гуляев В.А., Бугаев А.Е.* Логико-лингвистические методы в задачах диагностирования сложных объектов. – Киев: Ин-т пробл. моделир. в энерг., 1989. – Вып. 20. – 28 с.
17. *Цыганков М.П.* Научные основы корректирующего управления качеством функционирования автоматизированных технологических комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: 05.07.18: защищена 25.09.03: утв. 13.02.04. – Ярославль, 2003. – 348 с.
18. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем. – М.: СПб.: Изд-во МГУ: ГРИФ, 2001. – 225 с.
19. *Шумский А.Е.* Функциональное диагностирование нелинейных динамических систем в условиях параметрической неопределенности моделей // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 3. – С. 184-188.
20. *Жирабок А.Н., Шумский А.Е.* Методы и алгоритмы функционального диагностирования сложных технических систем. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 134 с.
21. *Кузьмин А.Б.* Функциональное диагностирование технической системы управления // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 5. – С. 183.
22. *Блинов А.Н., Осипов А.В.* Диагностирование параметрических отказов методами нечеткой логики // X Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. – Санкт-Петербург, 23–27 июня 2007 г. – С. 224-229.
23. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 163 с.
24. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
25. *Тэрано, Т., Асаи, К., Сугэно, М.* Прикладные нечеткие системы. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
26. *Усков А.А., Кузьмин А.В.* Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 143 с.
27. *Безмен Г.В., Колесов Н.В.* Функциональное диагностирование линейных динамических систем с использованием нечеткого анализа // Информационно-управляющие системы. – 2009. – № 5. – С. 67-73.

REFERENCES

1. *Parsheva E.A.* Detsentralizovannoe adaptivnoe upravlenie po vykhodu mnogosvyaznymi ob"ektami s zapazdyvaniem po sostoyaniyu [Adaptive decentralized output control of multi-variable objects with a state delay], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 5, pp. 14-22.
2. *Terekhov V.A., Tyukin I.Yu.* Evolyutsiya i problemy teorii adaptivnykh sistem upravleniya [Evolution and problems of the theory of adaptive control systems]. Chast' I. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. Part I [Mechatronics, Automation, Control], 2003, No. 6, pp. 9-18.
3. *Kondrashin A.V.* Bespoiskovye samonastravayushchiesya sistemy avtomaticheskogo upravleniya i perspektivy ikh primeneniya v teploenergetike [Searchless self-adjusting automatic control systems and prospects of their application in heat power engineering], *Sb. trudov «Avtomatizatsiya proizvodstva»* [Proceedings of "Automation of Production"]. Moscow, 2001, No. 4, pp. 1-10.
4. *Karasev V.S., Kondrashin A.V.* Realizatsiya bespoiskovoy samonastravayushcheysya sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Implementation of searchless self-adjusting automatic control systems], *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power engineering University], 2012, No. 1.
5. *Karasev V.S., Kondrashin A.V.* Metodika initsializatsii bespoiskovoy samonastravayushcheysya sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Method initialize analytical samonastro developing automatic control systems], *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power engineering University], 2013, No. 3, pp. 18-22.
6. *Rotach V.Ya., Kuzishchin V.F., Klyuev A.S. i dr.* Avtomatizatsiya nastroyki sistem upravleniya [Automation of configuration management systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 272 p.
7. *Kondrashin A.V.* Tekhnologicheskie osnovy upravleniya teploenergeticheskimi oborudovaniem [Technological framework for the management of thermal power equipment]. Moscow: Izd-vo «ISPO-Servis», 2004, 317 p.
8. *Koretskiy A.S., Rinkus E.K., Oster-Miller Yu.R. i dr.* Effektivnost' ASU teploenergeticheskimi protsessami [The efficiency of ACS heat power processes], ed. by A.S. Koretskogo, E.K. Rinkusa. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 316 p.
9. *Bastin G., Gevers M.* Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1988, Vol. 33, No. 7, pp. 650-658.
10. *Bastin G., Bitmead R., Campion G., Gevers M.* Identification of linearly overparametrized nonlinear systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1992, Vol. 37, No. 7, pp. 1073-1078.
11. *Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.* Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley and Sons Inc., 1995, 563 p.
12. *Krstic M., Wang H.-H.* Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems, *Automatica*, 2000, Vol. 36, pp. 595-601.
13. *Mikeladze M.A.* Razvitie osnovnykh modeley samodiagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [The development of basic self-diagnosis models of complex technical systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 1995, No. 5, pp. 3-18.
14. *Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y.* Patents, soft_ware, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*. Feb. 2006, pp. 41-54.
15. *Krasovskiy A.A.* Teoriya samoorganizuyushchegosya optimal'nogo regulatora s ekstrapolyatsiyey [The theory of self-organizing optimal regulator with extrapolation], *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya (v 3-kh chastyakh)* [Modern applied control theory (in 3 parts)]. Chast' I. Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya. Part I. [Optimization approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Taganrog: TRTU, 2000, pp. 268-311.
16. *Gulyaev V.A., Bugaev A.E.* Logiko-lingvisticheskie metody v zadachakh diagnostirovaniya slozhnykh ob"ektov [Logical-linguistic methods in problems of diagnosis of complex objects]. Kiev: In-t probl. modelir. v energ., 1989, Issue 20, 28 p.
17. *Tsygankov M.P.* Nauchnye osnovy korrektruyushchego upravleniya kachestvom funktsionirovaniya avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Scientific basis for corrective management of the quality of functioning of the automated technological complexes. Dr of eng. sc. diss.]: 05.13.06: 05.07.18: protected 25.09.03: approved 13.02.04. Yaroslavl', 2003, 348 p.
18. *Mironovskiy L.A.* Funktsional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh sistem [Functional diagnosis of dynamic systems]. Moscow: Spb.: Izd-vo MGU: GRIF, 2001, 225 p.

19. *Shumskiy A.E.* Funktsional'noe diagnostirovanie nelineynykh dinamicheskikh sistem v usloviyakh parametricheskoy neopredelennosti modeley [Functional diagnosis of nonlinear dynamic systems under parametric uncertainty models], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1994, No. 3, pp. 184-188.
20. *Zhirabok A.N., Shumskiy A.E.* Metody i algoritmy funktsional'nogo diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Methods and algorithms of functional diagnostics of complex technical systems]. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007, 134 p.
21. *Kuz'min A.B.* Funktsional'noe diagnostirovanie tekhnicheskoy sistemy upravleniya [Functional diagnostics of the technical control system], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1994, No. 5, pp. 183.
22. *Blinov A.N., Osipov A.V.* Diagnostirovanie parametricheskikh otkazov metodami nechetkoy logiki [Diagnosis for parametric failures, methods of fuzzy logic], *X Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [X international conference on soft computing and measurements], St.-Petersburg, 23–27 iyunya 2007, pp. 224-229.
23. *Zade L.A.* Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 163 p.
24. *Kofman A.* Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 432 p.
25. *Terano T., Asai K., Sugeno M.* Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir, 1993, 368 p.
26. *Uskov A.A., Kuz'min A.V.* Intellektual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennyye neyronnye seti i nechetkaya logika [Intelligent control technology. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2004, 143 p.
27. *Bezmen G.V., Kolesov N.V.* Funktsional'noe diagnostirovanie lineynykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem nechetkogo analiza [Functional diagnosis of linear dynamic systems using fuzzy analysis], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, No. 5, pp. 67-73.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Обуховец.

Кондрашин Анатолий Васильевич – Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ); e-mail: kav@dsn.ru; 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34; тел.: 89203597271; кафедра автоматизации технологических процессов; к.т.н.; профессор.

Карасёв Виктор Сергеевич – ООО «ТеконАвтоматика»; e-mail: karasevvs@ivtecon.ru; Иваново, Подгорный пер., 5; тел. 89038796144; аспирант ИГЭУ.

Kondrashin Anatolij Vasil'evich – Ivanovo State Power Engineering University (ISPEU), e-mail: kav@dsn.ru; 34, Rabfakovskaya street, Ivanovo, 153003, Russia; phone: +79203597271; the department of automation of technological processes; cand. of techn. sc.; professor.

Karasyov Viktor Sergeevich – LLC «TekonAvtomatica»; e-mail: karasevvs@ivtecon.ru; 5, Podgornaya lane, Ivanovo, Russia; phone: +79038796144; postgraduate student of ISPEU.

УДК 621.337.1:681.326.3

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-88102

К.И. Юренко, Е.И Фандеев

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассматриваются принципы построения систем автоведения подвижного состава железных дорог. Наиболее распространенным классом таких систем в нашей стране являются автономные бортовые системы автоведения. Их внедрение и эксплуатация позволяют повысить безопасность движения, энергоэффективность железнодорожного транспорта, улучшить условия труда локомотивных бригад. Анализируется история раз-