

Ю. Н. Хижняков, д-р техн. наук, проф., luda@at.pstu.ru,

А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, uz@at.pstu.ru,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Робастное управление объектом с экстремальной характеристикой в условиях неопределенности

Рассматривается робастное управление объектом с экстремальной статической характеристикой с помощью системы экстремального регулирования с запоминанием экстремума, стабилизации с применением адаптивных нечетких регуляторов и систем с явно выраженным минимумом статической характеристики с применением нечеткого регулятора.

Ключевые слова: тепловой объект, летательный аппарат, сигнум-реле, адаптивный нечеткий регулятор, фаззификатор, линейный нейрон, блок активационных функций, метод последовательного обучения нейрона, алгоритм Ларсена

Введение

Задача робастного управления заключается в достижении экстремальной цели (минимизации или максимизации) некоторого показателя объекта, значение которого зависит от управляемых и неуправляемых параметров объекта [1, 2]. Объекты экстремального управления отличаются недостаточностью информации на выходе объекта. Для получения информации в процессе управления необходимо вести поиск в виде специально организованных пробных шагов, и это отличает экстремальное управление от всех других видов управления. Отличительной особенностью экстремальных объектов является немонотонность (экстремальность) статической характеристики. Алгоритм решения экстремального управления имеет целью поддержание объекта в экстремальном состоянии независимо от возмущающих факторов, воздействующих на объект и изменяющих его состояние.

Разработка робастного управления недетерминированными объектами со статическими экстремальными характеристиками в системах реального времени связана с проблемой устойчивости, снижающей область практического применения. Примером таких объектов является любой тепловой объект; летательный аппарат, у которого по мере снижения веса из-за выгорания топлива необходимо снижать крейсерскую скорость в целях увеличения дальности полета; задача оптимального демпфирования следящей системы второго порядка и т.д.

Под качеством управления объекта с экстремальной статической характеристикой в условиях действия помех понимают минимум времени поиска и амплитуду

автоколебаний входа объекта. Для выполнения данного требования к алгоритму управления существуют системы экстремального управления с разными способами поиска экстремума, которые базируются на свойствах статической характеристики: с запоминанием экстремума, с применением вспомогательной модуляции, с измерением производной выхода объекта и т.д. [3].

В случае когда объект слабо изучен или имеет вербальное описание, желательно строить систему регулирования по отклонению, которая более совершенна, так как не требует процедуры поиска. Однако создать систему экстремального регулирования проще, чем систему автоматического регулирования. Совершенство системы автоматического регулирования получено за счет ее высокой организации, но имеет пониженную надежность и таит опасность возникновения неустойчивости. Ту или другую систему управления нужно выбирать исходя из конкретных условий и требований.

На рис. 1 приведены статические экстремальные характеристики теплового объекта и летательного аппарата.

Рассмотрим робастное управление теплового объекта.

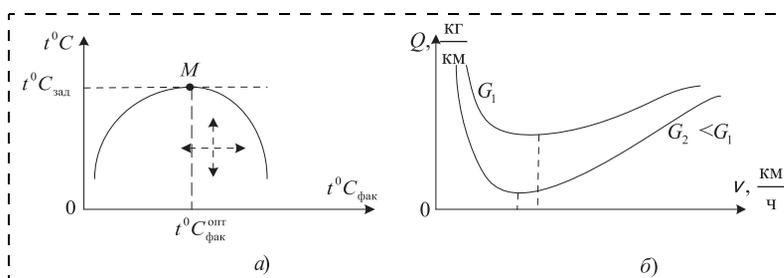


Рис. 1. Статические экстремальные характеристики объектов: а — тепловой объект; б — летательный аппарат

1. Робастное управление объектом с явно выраженным максимумом статической характеристики

В данном случае реализуется логическое управление с применением логического устройства (сигнум-реле), способного запоминать максимальное значение статической характеристики.

На рис. 2 показана структурная схема системы экстремального регулирования (СЭР) с запоминанием экстремума инерционного объекта.

Для инерционных объектов, когда инерционность объекта находится на выходе, возможна потеря экстремума из-за малого значения производной в точке, близкой к экстремуму. В этом случае на вход экстремального регулятора (ЭР) с запоминанием экстремума подается сигнал с выхода устройства формирования сигнала (УФС).

Структурная схема УФС включает усилитель, охваченный отрицательной обратной связью, и логическое устройство (ЛУ) для управления обратной связью УФС.

УФС реализует реальную первую производную входного сигнала за счет охвата усилителя отрицательной интегральной обратной связью, управляемой ЛУ.

При превышении порога срабатывания y_0 (рис. 3, а) УФС работает как динамический преобразователь сигнала с выхода объекта (сигнал пер-

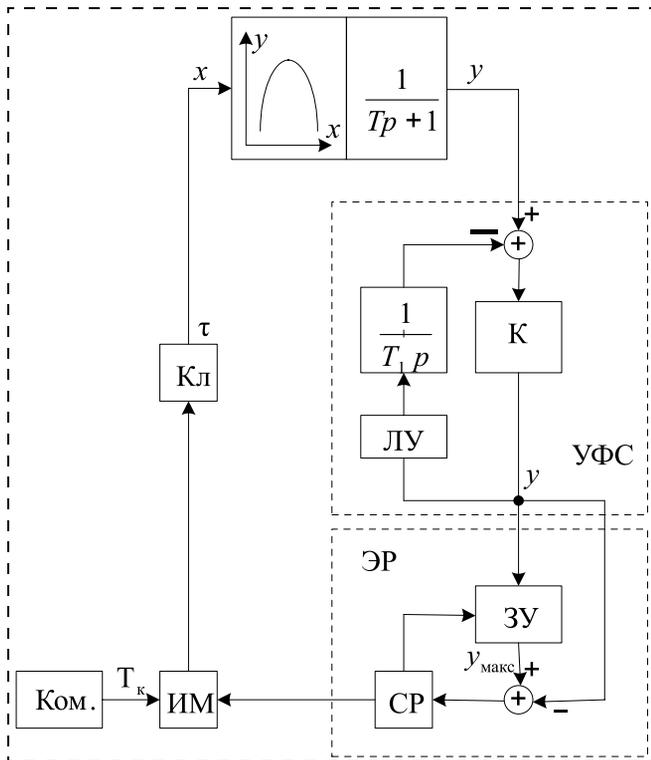


Рис. 2. Структурная схема СЭР с введением динамического преобразователя и логического устройства: Ком — коммутатор; ИМ — исполнительный механизм; ЛУ — логическое устройство; ЗУ — запоминающее устройство; УФС — устройство формирования сигнала; СР — сигнум-реле; ЭР — экстремальный регулятор

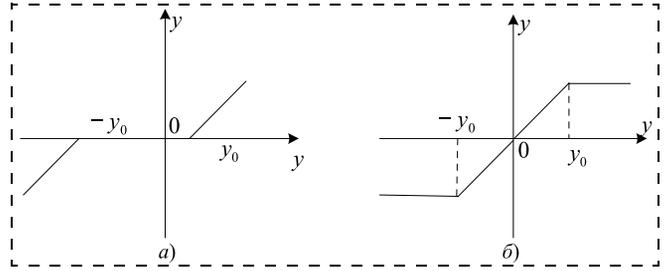


Рис. 3. Статические характеристики УФС

вой производной), а при снижении порога срабатывания y_0 обратная связь ЛУ разрывается, и УФС работает в режиме усилителя.

Рассмотрим работу СЭР с запоминанием экстремума. Пусть работа СЭР начинается с начальной координаты и производная выходного сигнала экстремального объекта $\frac{dy}{dt} > 0$. При этом испол-

нительный механизм (ИМ) увеличивает входную координату x экстремального объекта. В следующий момент времени срабатывает коммутатор (Ком), который работает независимо от сигнум-реле (СР). ИМ реверсируется, но уже в следующей точке реверсируется от СР и восстанавливает правильное направление движение СЭР к экстремуму. В следующей точке при достижении $x = x_{\text{опт}}$ значение производной $\frac{dy}{dt}$ достигает максимума и фиксируется запоминающим устройством (ЗУ). При уменьшении производной $\frac{dy}{dt}$ на величину y_n (зона нечувствительности СР) СР выполняет реверс ИМ, и СЭР движется от экстремума. В следующей точке при условии $\frac{dy}{dt} = \left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{max}} - y_n$ выполняется новый ре-

верс ИМ, и СЭР, поддерживая $\frac{dy}{dt}$, близкое $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{max}}$, будет с максимальной скоростью стремиться к экстремуму. Вблизи экстремума значение производной $\frac{dy}{dt}$ близко к нулю. ЛУ разрывает обратную связь в УФС, и СЭР автоматически переходит в режим поиска экстремума по y (рис. 3, б). При каждом реверсе ИМ включаются задержки во времени τ для исключения влияния переходных процессов в СЭР. Включение коммутатора необходимо для анализа пройденного пути за счет дополнительных включений ИМ с частотой в 2...3 больше, чем при включении ИМ от СР. Быстродействие СЭР с применением УФС повышается в 20...30 раз из-за включения поиска экстремума по первой производной выхода объекта по сравнению с поиском по ветвям статической характеристики [2].

Недостатком метода логического управления объектом является увеличение времени поиска, свя-

занное с дрейфом статической экстремальной характеристики вверх, потеря устойчивости при дрейфе статической экстремальной характеристики вниз, а также релейное включение ИМ с постоянной скоростью сервопривода от СР и коммутатора.

2. Робастное управление объектом с применением адаптивных нечетких регуляторов

Рассмотрим робастное управление теплового объекта с применением адаптивных нечетких регуляторов.

Применение адаптивного нечеткого управления исключает неопределенность в системе, связанную с дрейфом статической характеристики в любом направлении, например, из-за переменной калорийности топлива и изменения температуры окружающей среды.

Основным отличием в структуре управления является введение принципа регулирования по отклонению в основном контуре, например по температуре на выходе теплового объекта, и дополнительное введение контура управления температурой факела, который парирует сильное возмущение со стороны регулирующего органа и упреждает его влияние на изменение температуры на выходе недетерминированного (вербального) объекта.

На рис. 4 приведена структурная схема управления вербальным объектом с применением адаптивных нечетких регуляторов расхода воздуха и топлива.

Структурная схема САР (рис. 4) может быть применена для случая, когда основной параметр вербального объекта — это давление пара в котле, а дополнительный параметр — расход топлива, а также когда основной параметр вербального объекта — содержание кислорода в трубе, а дополнительный параметр — расход воздуха.

Адаптивный нечеткий регулятор, который показан на рис. 5, содержит фаззификатор, линейный нейрон с обратной алгоритмической связью и блок активационных функций. Терм-множество фаззификатора включает четыре линейных терма, располо-

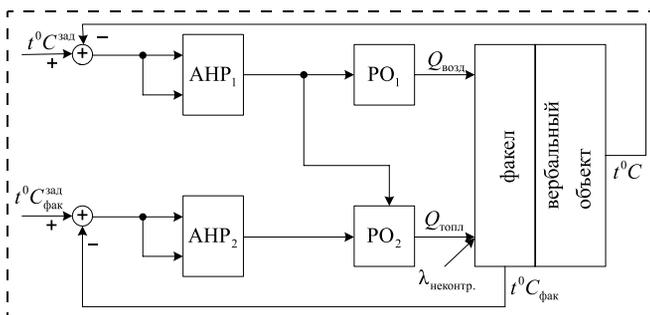


Рис. 4. Структурная схема управления недетерминированным (вербальным) объектом: АНР — адаптивный нечеткий регулятор; РО — регулирующий орган

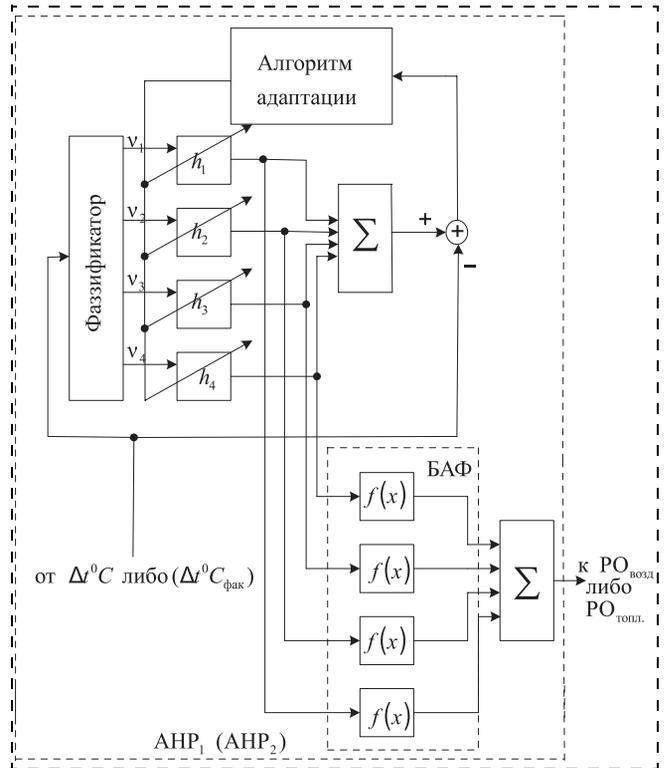


Рис. 5. Адаптивный нечеткий регулятор: БАФ — блок активационных функций

женных в интервале 0...1. Для определения степени принадлежности принята пропорция вида [4]

$$u_i^* = \frac{(x_i - x_{Hi})}{(x_{Bi} - x_{Hi})}, \quad (1)$$

где x_{Bi} и x_{Hi} — верхнее и нижнее значения параметра; x_i — текущее значение параметра x ; u_i^* — пропорциональное значение параметра x_i , которым является отклонение температуры на выходе вербального объекта от заданного значения либо температуры факела от заданного значения.

Математическое описание терм-множества фаззификатора имеет вид:

$$\mu_1(u^*) = 1 - u^*, u^* \in [0, 1]; \quad (2)$$

$$\mu_2(u^*) = \begin{cases} 3u^*, u^* \in [0, \frac{1}{3}]; \\ \frac{3}{2}(1 - u^*), u^* \in [\frac{1}{3}, 1]; \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_3(u^*) = \begin{cases} 1,5u^*, u^* \in [0, \frac{2}{3}]; \\ 3(1 - u^*), u^* \in [\frac{2}{3}, 1]; \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_4(u^*) = u^*, u^* \in [0, 1]. \quad (5)$$

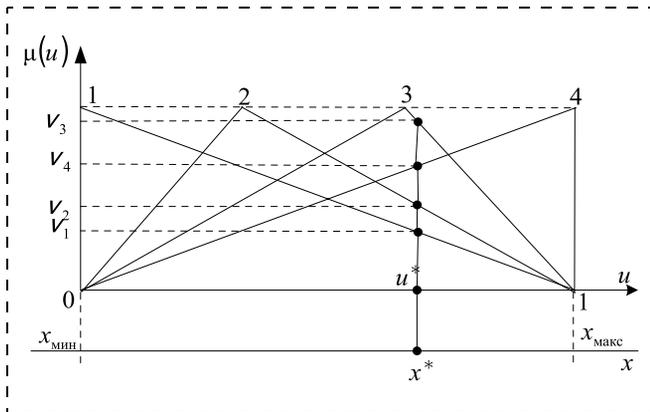


Рис. 6. Терм-множество фаззификатора адаптивного нечеткого регулятора

Графическое расположение терм-множества фаззификатора адаптивного нечеткого регулятора показано на рис. 6.

Степени принадлежности для текущего пропорционального значения параметра x являются входами линейного нейрона, где адаптация нейрона выполнена методом последовательного обучения с помощью рекуррентной формулы [5, 6]

$$h_{j+1} = h_j + (x_j - x_{ju}) \frac{u_j}{u_j^T u_j}, \quad (6)$$

где h_{j+1} — последующий шаг ($j+1$)-й итерации; h_j — предыдущий шаг j -й итерации; x_j — текущий выход модели; x_{ju} — оценка выхода модели; $(x_j - x_{ju})$ — ошибка в оценке x_j ; u_j — измеряемая функция; T — транспонирование.

Скорректированные синапсы нейрона подаются на вход блока активационных функций, содержащего набор смещенных сигмоидных функций [6]

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-ax)}. \quad (7)$$

С уменьшением значения параметра a сигмоид становится более пологим, в пределе при условии $a = 0$ вырождаясь в горизонтальную линию на уровне 0,5. При увеличении a сигмоид приближается по внешнему виду к функции единичного скачка с порогом в точке $x = 0$.

Совершенство системы автоматического регулирования с применением адаптивных нечетких регуляторов получено за счет ее высокой организации.

3. Робастное управление объектом с явно выраженным минимумом статической характеристики

Рассмотрим применение нечеткого управления для управления недетерминированным объектом с явно выраженным минимумом статической характеристики.

Примером такого объекта является летательный аппарат, у которого по мере снижения веса из-за выгорания топлива необходимо снижать крейсерскую скорость в целях увеличения дальности полета. Статическая характеристика "километровый расход топлива в функции скорости полета в зависимости от веса летательного аппарата" имеет явно выраженный минимум (см. рис. 1, б, где G — вес летательного аппарата) [8].

Для поиска точки экстремума (минимума) статической характеристики необходимо установить датчик массового и мгновенного расхода топлива дозатора. Согласно информации о массовом расходе, плотности топлива и времени полета можно судить о массе сгоревшего топлива. Далее необходимо определить обратную пропорциональную зависимость между массой сгоревшего топлива и мгновенным расходом топлива для коррекции расхода топлива дозатора вербального объекта (авиационного двигателя) по мере полета летательного аппарата.

На рис. 7 приведена структурная схема САР расхода топлива дозатора, где терм-множество фаззификатора нечеткого регулятора (НР) расположено на интервале $0 \dots 1$ (см. рис. 6). Для определения степени принадлежности принята пропорция вида (1) [4]. Согласно текущему значению x_i определяются степени принадлежности $v_{1i}, v_{2i}, v_{3i}, v_{4i}$ (выход фаззификатора). На рис. 8 приведено графическое изо-

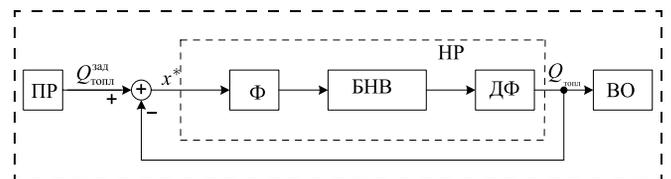


Рис. 7. Структурная схема автоматического регулирования расхода топлива дозатора:

Ф — фаззификатор; БНВ — блок нечеткого вывода; ВО — виртуальный объект; ДФ — дефаззификатор; НР — нечеткий регулятор; ПР — программатор

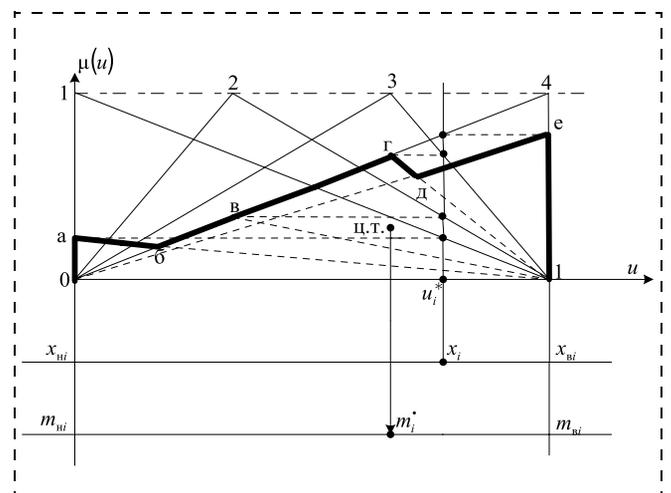


Рис. 8. Графическое изображение нечеткой импликации согласно алгоритму Ларсена и нечеткой композиции блока вывода нечеткого регулятора

бражение нечеткой импликации с применением алгоритма Ларсена и нечеткой композиции.

Используя алгоритм нечеткой импликации по Ларсену (рис. 8), запишем функцию принадлежности (кривая 0-а-1) для текущего значения x_i :

$$\mu_{C_{1i}}(u^*) = c_{1i}\mu_{1i}(u^*). \quad (8)$$

Аналогично, согласно нечеткой импликации по Ларсену запишем функцию принадлежности (кривая 0-в-1) (рис. 8) для текущего значения x_i :

$$\mu_{C_{2i}}(u^*) = c_{2i}\mu_{2i}(u^*). \quad (9)$$

Далее, согласно нечеткой импликации по Ларсену запишем функцию принадлежности (кривая 0-г-1) (рис. 8) для текущего значения x_i :

$$\mu_{C_{3i}}(u^*) = c_{3i}\mu_{3i}(u^*). \quad (10)$$

В конце также согласно алгоритму нечеткой импликации по Ларсену запишем функцию принадлежности (кривая 0-е-1) (рис. 8) для текущего значения x_i

$$\mu_{C_{4i}}(u^*) = c_{4i}\mu_{4i}(u^*). \quad (11)$$

Результирующая функция принадлежности согласно (8), (9), (10), (11) имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(u^*) &= \\ &= \mu_{C_{1i}}(u^*) \cup \mu_{C_{2i}}(u^*) \cup \mu_{C_{3i}}(u^*) \cup \mu_{C_{4i}}(u^*). \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения текущего значения управляющего воздействия формируется "результирующая фигура", ограниченная результирующей функцией принадлежности (12) (жирной линией 0-а-б-в-г-д-е-1, рис. 8) для текущего значения x_i :

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(u^*) &= \\ &= \max[\mu_{C_{1i}}(u^*), \mu_{C_{2i}}(u^*), \mu_{C_{3i}}(u^*), \mu_{C_{4i}}(u^*)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Поиск координат "центра тяжести" результирующей фигуры (13) выполнен согласно модифицированному методу центраоида [7]:

$$x_{\text{ЦТ}}^{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right); \quad (14)$$

$$y_{\text{ЦТ}}^{\Sigma} = \frac{0,5}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad (15)$$

где n — число разбиений; S_i — площади текущих разбиений; x_i, x_{i-1} — координаты абсцисс текущих разбиений.

Полученное значение абсциссы согласно (14) преобразуется в численное значение управляющего воздействия (расход топлива).

Заключение

1. Разработано робастное управление объектом с экстремальной (максимум) статической характеристикой с помощью системы экстремального регулирования с запоминанием экстремума.

2. Разработано робастное управление объектом с экстремальной (максимум) статической характеристикой с применением систем стабилизации.

3. Разработано робастное управление объектом с экстремальной (минимум) статической характеристикой с помощью системы стабилизации.

4. Разработан адаптивный нечеткий регулятор с применением линейного нейрона для управления вербальным (тепловым) объектом с применением алгоритма Ларсена.

5. Разработан нечеткий регулятор для управления вербальным (летательный аппарат) объектом с применением алгоритма Ларсена.

Список литературы

1. **Растргин Л. А.** Системы экстремального управления. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. 632 с.
2. **Техническая кибернетика.** Теория автоматического регулирования. Кн. 3. Ч. 11. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся автоматического регулирования. М.: Изд-во Машиностроение, 1969. 367 с.
3. **Либерзон Л. М., Родов А. Б.** Системы экстремального регулирования. М.: Энергия, 1965. 120 с.
4. **Гостев В. И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
5. **Хижняков Ю. Н.** Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.
6. **Хижняков Ю. Н.** Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.
7. **Леготкина Т. С., Хижняков Ю. Н.** Модификация метода центраоида // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 122—125.
8. **Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А.** Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.

Robust Control of an Object with an Extreme Characteristic in Conditions of Uncertainty

Yu. N. Khizhnyakov, luda@at.pstu.ru✉, A. A. Yuzhakov, uz@at.pstu.ru,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Corresponding author: **Khizhnyakov Yury N.**, D. Sc., Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation,
e-mail: luda@at.pstu.ru

Received on June 30, 2016

Accepted on July 15, 2016

Extreme control objects are distinguished by insufficiency of information on their outputs. In order to obtain information during the control process a special search should be organized in the form of the multiple trial steps, with consideration of the non-monotonous (extreme) form of the static characteristic. An example of this is any heating object, an aircraft, which due to fuel burning out and weight loss has to limit its cruising speed in order to increase its flight range, an optimal dampening task of a second-order tracking system, etc. The article considers the robust control for a nondetermined object with an extreme static characteristic by means of an extreme control system with an extremum storing mechanism, and stabilization systems based on the adaptive fuzzy controllers, and with the use of an object with a pronounced minimum of its static characteristic. The thermal object, operating in the conditions of uncertainty, requires development of a nonlinear approximation circuit (adaptive fuzzy controller), containing a fuzzificator, a linear artificial neuron with an algorithmic feedback, and functions activation unit. Fuzzificator term set contains four linear terms arranged within the interval of 0–1. Deviation of a temperature from its optimal value is used as a linguistic variable. The membership degrees of the activated membership functions are multiplied with the synapses of the feedback-driven neuron. Correction of the synapses is implemented with the help of the adaptation algorithm, which gives its adaptive properties to the temperature controller in relation to the external disturbances (for example, variable calorific value). The regulatory action by means of the functions activation unit controls operation of the air or fuel regulatory mechanism. Application of the developed adaptive fuzzy temperature controllers allows us to ensure maintaining of an exact temperature of a verbal object within the range of 3 % of the given value.

Keywords: thermal facility, aircraft, signum relay, adaptive fuzzy control, fuzzificator linear neuron, activation function unit, method of a sequential neuron learning, Larsen algorithm

For citation: **Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A.** Robust Control of an Object with an Extreme Characteristic in Conditions of Uncertainty, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 75–80.

DOI: 10.17587/mau.18.75-80

References

1. **Rastrigin L. A.** *Sistemy jekstremal'nogo upravlenija* (Extreme Control Systems), Moscow, Nauka, 1974, 632 p. (in Russian).
2. **Tehnicheskaja kibernetika. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. Kniga 3. Chast' 11. Teorija nestacionarnyh, nelinejnyh i samonastrajajushhihsja avtomaticheskogo regulirovanija** (Technical cybernetics. The theory of automatic control. Book. 3. Ch. 11. The theory of non-stationary, non-linear and self-adjusting automatic control), Moscow, Mashinostroenie, 1969, 367 p. (in Russian).
3. **Liberzon L. M., Rodov A. B.** *Sistemy jekstremal'nogo regulirovanija* (), Moscow, Jenergiya, 1965, 120 p. (in Russian).
4. **Gostev V. I.** *Proektirovanie nechetkih reguljatorov dlja sistem avtomaticheskogo upravlenija* (Extreme control systems), SPb, BHV-Peterburg, 2011, 416 p. (in Russian).
5. **Hizhnyakov Ju. N.** *Algoritmy nechetkogo, nejronnogo i nejro-nechetkogo upravlenija v sistemah real'nogo vremeni* (Fuzzy algorithms, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems), Perm', Publishing house of Perm. Nat. Res. Politehn. university, 2013, 156 p. (in Russian).
6. **Hizhnyakov Ju. N.** *Nechetkoe, nejronnoe i gibridnoe upravlenie: ucheb.posobie* (Fuzzy, neural and hybrid control), Perm', Publishing house of Publishing house of Perm. Nat. Res. Politehn. university, 2013, 303 p. (in Russian).
7. **Legotkina T. S., Hizhnyakov Ju. N.** *Modifikacija metoda centroida* (Modification of the method of the centroid), *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 2011, no. 1, pp. 122–125 (in Russian).
8. **Sinjakov A. N., Shajmardanov F. A.** *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija LA i ih silovymi ustanovkami* (Aircraft and their power plants Automatic control systems), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 320 p. (in Russian).



25—28 апреля в Санкт-Петербурге в КВЦ "Экспофорум" состоится

Международная конференция и выставка РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ — 2017

Цель конференции — обсуждение существующих и перспективных направлений развития систем релейной защиты, противоаварийной и режимной автоматики (РЗА), определение основных тенденций и путей повышения эффективности и надежности систем РЗА на основе современных достижений и опыта, накопленного ведущими мировыми экспертами и российскими специалистами в этой области и представленного в деятельности Исследовательского комитета CIGRE B5 "Релейная защита и автоматика" и подкомитета B5 РНК СИГРЭ.

Подробную информацию о конференции см. сайте:

<http://www.rza-expo.ru/ru/>