

УДК 681.513.7

В.В. Соловьев, В.И. Финаев

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ ОБЪЕКТА С НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ МОДЕЛЬЮ**

Разработана структура системы управления с нечетким регулятором и эталонной моделью. Предложен метод разработки адаптивного нечеткого регулятора, позволяющий реализовать управление объектами с неопределенной моделью. Определен состав и параметры элементов системы управления. Описан механизм адаптации базы правил нечеткого регулятора и положения функций принадлежности выходного сигнала. Приведены результаты экспериментов при изменении параметров элементов системы управления и входных воздействий.

Адаптивный нечеткий регулятор; механизм адаптации.

V.V. Soloviev, V.I. Finaev

**TECHNIQUE OF SYNTHESIS OF THE ADAPTIVE FUZZY REGULATOR
FOR OBJECT WITH UNCERTAIN MODEL**

The structure of a control system is offered with a fuzzy regulator and reference model. The technique of working out is offered of an adaptive fuzzy regulator, allowing is offered to realise management of objects with uncertain model. The structure and parametres is defined of elements of a control system. The adaptation mechanism base of rules a fuzzy regulator and position is described of functions a accessory of a target signal. Results of experiments are resulted at change of elements parametres of a control system and entrance influences.

Adaptive fuzzy regulator; the adaptation mechanism.

Современные промышленные производства отличаются высокой сложностью, обусловленной большим количеством локальных объектов управления, взаимосвязанностью подсистем, наличием неопределенности воздействий и параметров в отдельных контурах регулирования [1–3]. Традиционные промышленные регуляторы (ПИД-регуляторы) выполняют свои функции, но требуют периодической настройки параметров или изменения структуры, что не всегда положительно сказывается на эффективности управления технологическим процессом.

Названные сложности можно избежать при применении регуляторов с нечеткой логикой (далее, нечеткие регуляторы). Системы управления с такими регуляторами обладают, как правило, большей робастностью, по сравнению с системами с традиционными регуляторами, и не требуют априорного знания модели объекта управления [4–7].

Сложностью при разработке нечетких регуляторов является необходимость привлечения специалистов (экспертов) в соответствующей области промышленности для разработки базы правил, вида и расположения функций принадлежности входных и выходных сигналов. Даже опытные эксперты не всегда в состоянии охватить всю область допустимых управлений для сложных объектов с большим количеством входных сигналов, так как регулятор в этом случае может содержать сотни нечетких правил.

В данной работе предлагается метод синтеза адаптивного нечеткого регулятора для объекта с неопределенной математической моделью. Адаптация регулятора заключается в автоматическом построении базы правил и изменении функций принадлежности выходного сигнала регулятора при функционировании объекта управления в рабочем режиме без использования тестовых воздействий. Впервые подобный регулятор такого типа предложен в работе [7].

Структура системы управления с адаптивным нечетким регулятором приведена на рис. 1. Исследуемая система представляет собой адаптивную систему управления с эталонной моделью (ЭМ) в дискретном виде.

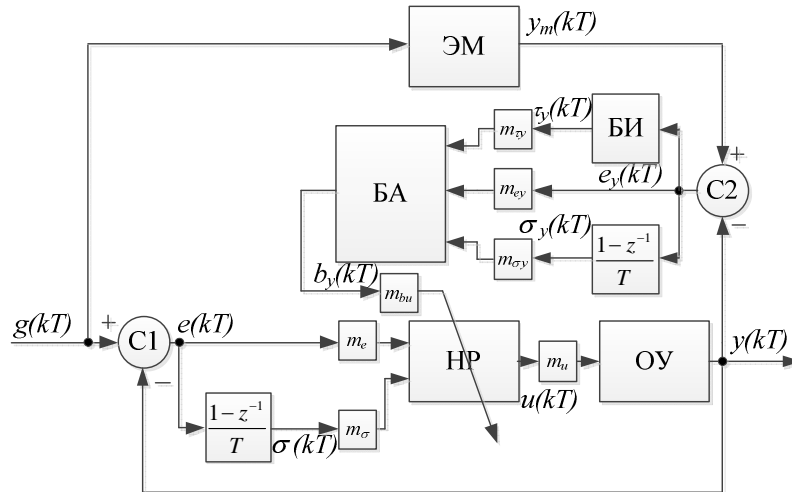


Рис. 1. Структура системы управления с адаптивным нечетким регулятором:
 НР – нечеткий регулятор; БА – блок адаптации; ОУ – объект управления;
 ЭМ – эталонная модель; C1, C2 – сравнивающие элементы;
 БИ – блок интегрирования

Задающее воздействие $g(kT)$ поступает на вход ЭМ и на вход сравнивающего элемента (C1) основного контура управления. На выходе ЭМ формируется ее реакция $y_m(kT)$. На выходе сравнивающего элемента (C2) формируется сигнал ошибки $e_y(kT)$, как рассогласование между выходным сигналом $y_m(kT)$ ЭМ и выходным сигналом $y(kT)$ объекта управления (ОУ). По сигналу ошибки $e_y(kT)$ рассчитывается ее производная $\sigma_y(kT)$ и приращение интеграла $\tau_y(kT)$ в блоке интегрирования (БИ). После масштабирования (m_{e_y} , m_{σ_y} , m_{τ_y}) сигналы поступают на вход блока адаптации (БА). В БА рассчитывается не интеграл ошибки, а его изменение за n тактов, что позволяет получить более информативный сигнал, чем полное интегрирование сигнала ошибки. Это связано с тем, что нечеткие регуляторы не обладают внутренней динамикой и введение полностью интегрированного сигнала в структуру контроллера нецелесообразно.

БА представляет собой структуру нечеткого контроллера Мамдани.

Для фаззификации ЛП "ошибка" и "производная ошибки" использовано пять ФП треугольного вида, для фаззификации ЛП "изменение интеграла ошибки" – две, для фаззификации ЛП "выходной сигнал" – семь.

Большее количество ФП для ЛП "выходной сигнал" введено для устранения колебаний во время переходного процесса и в установившемся режиме, т.е. чтобы реализовывался плавный сдвиг ФП в нечетком регуляторе (НР) и обеспечивалось "мягкое" управление.

В БИ происходит расчет изменения интеграла ошибки в следующем порядке:

- 1) фиксируются в памяти nT отсчетов времени;
- 2) фиксируются в памяти nT отсчетов e_y ;
- 3) рассчитывается τ_y по формуле

$$\tau_y = \frac{kT - (k-n)T}{n} \cdot \sum_{i=0}^n e_y(k-i).$$

На выходе С1 формируется сигнал ошибки $e(kT)$, по которому рассчитывается ее производная $\sigma(kT)$. Оба сигнала после масштабирования (m_e, m_σ) поступают на вход НР. Для фаззификации ЛП "ошибка" и "производная ошибки" использовано одиннадцать ФП треугольного вида, для фаззификации ЛП "выходной сигнал" – $11 \times 11 = 121$ (равно количеству правил в базе правил НР). Расположение ФП для ЛП "выходной сигнал" может быть произвольным. Для удобства моделирования у них устанавливаются нулевые координаты вершин. Следовательно, в начале моделирования база правил НР пустая и расположение ФП выходного сигнала одинаковое.

При поступлении на вход НР-сигналов ошибки и ее производной выполняется операция фаззификации, в результате чего определяются активные ФП соответствующих ЛП. При этом определяется от 2 до 4 активных ФП, в зависимости от значения поступающих сигналов. В пустой базе правил ищутся правила (далее активные правила), посылки которых включают сочетания активных ФП, т.е.

$$\mu_r(e(kT), \sigma(kT)) = \min\{\mu_i(e(kT)), \mu_j(\sigma(kT))\} > \eta,$$

где η ($0 \leq \eta \leq 1$) – параметр, который определяет "грубость" операции агрегирования.

При этом в БА заранее рассчитана величина сдвига ФП для выходного сигнала НР. Для активных правил выполняется сдвиг ФП выходного сигнала НР.

Рассчитываются координаты центров $c_j(kT)$ функций принадлежности выходного сигнала в момент времени kT для активных заключений в соответствии с выражением

$$c_j(kT) = c_j(kT-T) + \psi \cdot b_u(kT),$$

где $c_j(kT-T)$ – центры функций принадлежности активных заключений на предыдущем такте; ψ – модификатор величины сдвига.

Далее продолжается выполнение стандартного алгоритма нечеткого вывода Мамдани: активация, аккумулярование, дефаззификация. Таким образом, выполняется заполнение базы правил и определение положения ФП выходного сигнала НР в режиме нормального функционирования ОУ.

В адаптивной системе управления будем использовать эталонные модели в виде дискретных передаточных функций первого порядка, полученные на основе преобразования Тастина (Tustin) [7] из непрерывных функций, путем замены $s = (2(z-1)) / (T(z+1))$:

$$W(s) = \frac{y_m(s)}{g(s)} = \frac{k_m}{T_m s + 1} \rightarrow W(z) = \frac{y_m(z)}{g(z)} = \frac{k_m T (z+1)}{(2T_m + T)z + (T - 2T_m)}, \quad (1)$$

где k_m, T_m – коэффициент передачи и постоянная времени эталонной модели соответственно; T – период квантования.

Из (1) получим уравнение

$$y_m(k) = \frac{1}{T + 2T_m} (k_m \cdot T \cdot g(k) + k_m \cdot T \cdot g(k-1) + y_m(k-1)(2 \cdot T_m - T)),$$

которым воспользуемся при моделировании ЭМ.

В качестве модели ОУ была выбрана модель 2-го порядка в дискретном виде. С ее помощью можно провести исследование динамики широкого класса систем с апериодическим и колебательным переходным процессом для устойчивых и неустойчивых ОУ [3].

Коэффициенты m_{ey} , $m_{\sigma y}$, $m_{\tau y}$, m_{σ} в начале исследования устанавливаются равными единице. В процессе моделирования фиксируются максимальные значения входных сигналов БА и максимальное значение сигнала производной ошибки на входе НР. Далее эти коэффициенты устанавливаются равными обратным величинам найденных максимальных значений сигналов и моделирование продолжается. Процесс определения коэффициентов можно сделать непрерывным, если закончить их поиск и провести назначение величин при достижении установившегося режима работы системы управления.

На начальном этапе моделирования положены следующие значения параметров ЭМ и ОУ: $k_m=1$, $T_m=1$, $k=2,5$, $\xi=0,07$ (коэффициент демпфирования), $\omega=1$ (собственная частота ОУ). Остальные параметры системы установлены следующими: $m_{ey}=0,31$, $m_{\sigma y}=1,2$, $m_{\tau y}=0,0065$, $n=5$, $m_r=0,9$, $m_u=1$, $m_e=1$, $m_{bu}=1,56$, $T=0,01$, $\psi=1$. Исследование системы управления выполнялось в среде MatLab 7.11.

Реакции системы на единичное ступенчатое и гармоническое ($\sin(kT)$) воздействия приведены на рис. 2, а, б.

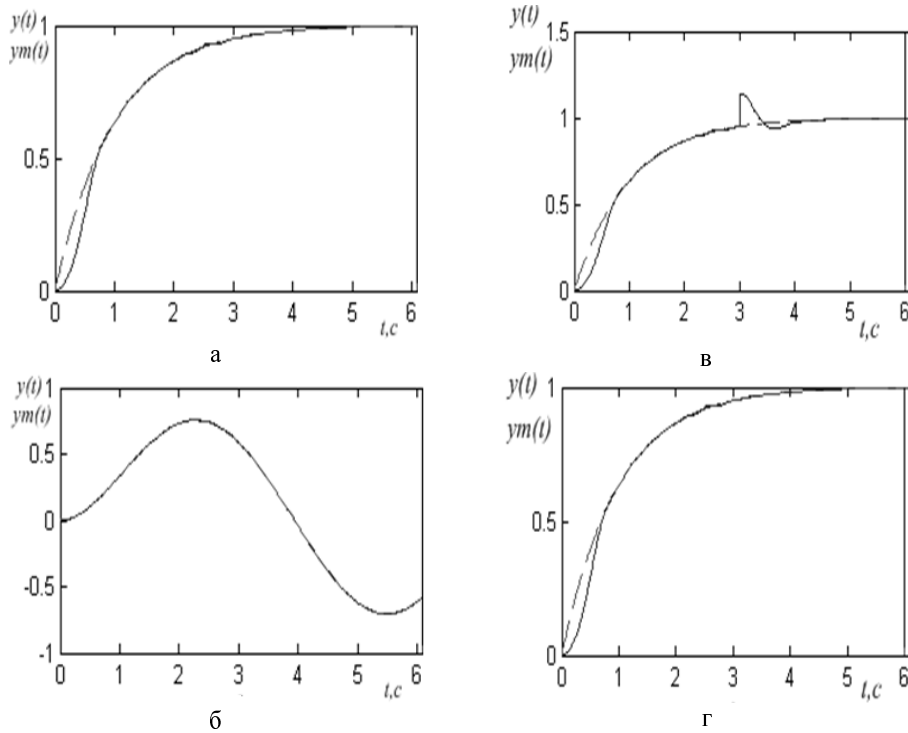


Рис. 2. Реакция системы управления на входные воздействия и возмущения:
 а – реакция на ступенчатое воздействие; б – реакция на гармоническое воздействие; в – статическая помеха на выходе; г – изменение коэффициента демпфирования

Как видно из рис. 2, а, разница между желаемым поведением ОУ (пунктирная линия) и действительным (сплошная линия) сказывается только на начальном этапе переходного процесса. Это связано с тем, что ОУ не может отработать мгновенно "жестко" заданные требования к его динамике, соответствующей динамике ЭМ. При гармоническом воздействии динамика системы управления соответствует требуемой. Дальнейшие исследования проводились при подаче единичного ступенчатого воздействия.

На рис. 2,в приведена реакция системы со статической помехой на выходе объекта управления. Помеха введена в момент времени $t=3$ с по величине 20 % от установившегося значения выходного сигнала. Видно, что адаптивный нечеткий регулятор устранил влияние помехи за 1 с.

На рис. 2,г приведена реакция системы при изменении коэффициента демпфирования модели ОУ с 0,07 до 1. Это изменение не оказало влияния на выходной сигнал ОУ. Кроме того, дополнительно было выполнено моделирование системы при изменении коэффициента демпфирования ОУ с 1 до 0,07 и это изменение не оказало влияния на выходной сигнал ОУ.

Дополнительно были проведены эксперименты с изменением собственной частоты ОУ во время переходного процесса. Были проведены эксперименты при резком изменении частоты с 1 до 0,01 в момент времени $t=3$ с и при случайном изменении частоты на всем временном интервале в диапазоне от 0 до 1. При этом установлено, что влияние на систему управления эти изменения не оказывают, и переходной процесс соответствует изображенному на рис. 2,г.

При изменении количества отсчетов n для расчета изменения интеграла ошибки с 4 до 10 были выявлены незначительные отличия между кривыми переходных процессов, связанные с разной длительностью до момента начала расчета изменения интеграла.

Исследования показали, что предложенный адаптивный нечеткий регулятор обеспечивает высокое качество управления при различных воздействиях и переменных параметрах моделей. Робастные свойства системы управления позволяют использовать регулятор для объектов с неопределенной моделью, так как методика предлагает простую и обоснованную настройку его параметров. Здесь на передний план выходит задача грамотного выбора эталонной модели для обеспечения желаемой динамики системы.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с улучшением показателей качества управления путем использования принципа сжатия универсальных множеств ЛП входных сигналов НР. Суть состоит в том, чтобы величина ошибки и ее производной в каждый момент времени целиком укладывалась на интервале базового множества лингвистических переменных. Это обеспечивает максимальное быстродействие системы управления. Сжатие базового множества можно реализовать путем сдвига (сжатия) термов лингвистических переменных в зависимости от сигнала задания и величины текущей ошибки.

Кроме того, дальнейшее совершенствование регулятора возможно с использованием уже заполненной базы правил с предыдущего переходного процесса. В настоящее время исследования направлены на применение регулятора в технологических процессах для обучения используемых регуляторов. В связи с этим ведутся исследования по разбиению универсального множества ЛП "выходной сигнал" НР на интервалы, в пределах которых допустим сдвиг ФП. В этом случае не происходит замещение одних ФП другими в процессе адаптации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.В., Финаев В.И. Постановка задачи синтеза управления сложной системой в условиях априорной неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 59-65.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – СПб.: Изд-во Профессия, 2003. – 752 с.
4. Усков А.А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы: "Управление, контроль, диагностика". – 2004. – № 6. – С. 7-13.

5. Деменков Н.П. Нечеткое управления в технических системах: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
6. Соловьев В.В., Финаев В.И. Разработка нечеткого регулятора для двигателя постоянного тока в условиях неопределенности // Вопросы специальной радиоэлектроники. Научно-технический сборник. Серия Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР). – 2010. – № 3. – С. 130-139.
7. Passino, Kevin M. Fuzzy control. Addison Wesley Publishing Company. 1997. – 475 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Соловьев Виктор Владимирович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371773; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Финаев Валерий Иванович – e-mail: fin_val_iv@tsure.ru; кафедра систем автоматического управления; заведующий кафедрой; профессор.

Soloviev Victor Vladimirovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371773; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Finaev Valery Ivanovich – e-mail: fin_val_iv@tsure.ru; the department of automatic control systems; head the department; professor.

УДК 681.3.01:621.311

М.В. Щербаков, Н.Л. Щербакова, И.П. Козлов, В.А. Камаев

КОННЕКТИВИСТСКИЕ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ СИСТЕМ НА КОРОТКИХ ИНТЕРВАЛАХ НАБЛЮДЕНИЯ С ЗАДАНЫМ МНОЖЕСТВОМ КЛАССОВ ПОВЕДЕНИЯ*

Дается описание нового подхода идентификации динамических нестационарных систем, основанного на последовательной идентификации поведения системы на коротком интервале наблюдения и построения локальных коннективистских моделей идентификации состояния системы для каждого из определенных классов поведения. Спецификой методики, рассмотренной в данной статье, является заданное заранее множество классов поведения. Проведены испытания методики и показана ее эффективность при решении задач идентификации потребителей электроэнергии.

Идентификация; короткий интервал наблюдения; идентификация динамики систем; коннективистская система; интеллектуальный анализ данных.

M.V. Shcherbakov, N.L. Shcherbakova, I.P. Kozlov, V.A. Kamaev

CONNECTIONISTS SYSTEMS FOR BEHAVIOR IDENTIFICATION IN SHORT INTERVALS OF OBSERVATION: CASE WITH DEFINED CLASSES OF BEHAVIOUR

This article describes a novel approach for dynamic time-varying systems identification. This method is based on a consistent identification of system behavior in short interval of observation and creating local connectionists identification models for each particular class of behavior.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 10-07-97008-р_поволжье_а.