

УДК 681.51

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-101-109

Двухуровневая нечеткая система управления динамическими объектами

Д.Н. Анисимов, Май Тхе Ань

Рассмотрена двухуровневая нечеткая система управления динамическими объектами, представляющая собой одну из разновидностей адаптивных систем управления. Необходимость адаптации обусловлена изменением параметров объекта управления во времени. Система состоит из двух контуров — исполнительного и супервизорного. В исполнительном контуре осуществляется непосредственное воздействие на объект сигналом с выхода регулятора. Супервизорный контур служит для отслеживания показателей качества системы и периодической подстройки регулятора при выходе этих показателей за допустимые пределы.

Предложена реализация как исполнительного, так и супервизорного контура на основе алгоритмов нечеткого логического вывода. Нечеткие логические регуляторы (НЛР) в настоящее время достаточно широко распространены в задачах управления сложными объектами. Тем не менее, их настройка до сих пор носит преимущественно эвристический характер. В статье продемонстрирован подход к настройке НЛР, основанный на комплексных исследованиях его статических и динамических характеристик. Это позволило, во-первых, оценить влияние тех или иных факторов на динамические свойства регулятора; во-вторых, выбрать те настройки, которые могут быть наиболее эффективно использованы при построении супервизорного контура; в-третьих, сделать более целенаправленным поиск управляющих решений, обеспечивающих требуемые показатели качества системы управления. Выбран алгоритм на основе нечетких реляционных моделей, который не является альтернативой известным алгоритмам Мамдани, Ларсена, Цукамото. Он может использоваться совместно с ними и представляет собой модификацию механизма нечеткого логического вывода на этапе активизации правил. При его использовании устанавливается нечеткое соответствие между входными и выходными нечеткими переменными. При этом отпадает необходимость привязки к какой-либо из операций нечеткой импликации и появляется возможность влиять на результат нечеткого вывода, изменяя не только функции принадлежности термов входных и выходных лингвистических переменных, но и элементы нечеткого соответствия.

Сформулированы основные факторы, влияющие на динамические свойства НЛР, и выработаны рекомендации по использованию каждого из этих факторов при его настройке. Определены условия, при которых целесообразно осуществлять подстройку нечеткого регулятора под изменяющиеся параметры объекта управления.

Составлены функции принадлежности и базы правил алгоритмов нечеткого логического вывода, обеспечивающих качественную работу системы управления объектом с изменяющимися параметрами в достаточно широком диапазоне частот входного сигнала. Приведены результаты моделирования системы, свидетельствующие о том, что введение в систему дополнительного супервизорного контура позволяет поддерживать работоспособность системы и обеспечивать приемлемые показатели качества управления нестационарным динамическим объектом.

Ключевые слова: система управления динамическими объектами, нечеткие логические регуляторы, алгоритмы нечеткого логического вывода.

Для цитирования: Анисимов Д.Н., Май Тхе Ань. Двухуровневая нечеткая система управления динамическими объектами // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 101—109. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-101-109.

A Two-Level Fuzzy System for Control of Dynamic Objects

D.N. Anisimov, Mai The Anh

The article discusses a two-level fuzzy system for control of dynamic objects, which is a kind of adaptive control systems. The need of adaptation is stemming from variability of controlled plant parameters with time. The system comprises an executive loop and a supervisory loop. The executive loop produces a command directly applied to the plant in accordance with the signal generated at the regulator output. The supervisory loop monitors the system performance quality indicators and periodically adjusts the regulator tuning parameters when the quality indicators go beyond the permissible limits.

Solutions for implementing both the executive and supervisory loops on the basis of fuzzy logic inference algorithms are proposed. Fuzzy logic controllers (FLC) have received fairly wide use for control of intricate plants. However, the method of selecting their tuning parameters still remains heuristic in nature. The article describes an approach to tuning a fuzzy-logic controller based on comprehensive studies of its static and dynamic characteristics. The applied approach opened the possibility (i) to assess the influence of various factors on the controller's dynamic properties, (ii) to choose the tunings that can be most effectively used in setting up the supervisory loop, and (iii) to make the search for control solutions ensuring the required control system performance quality indicators more goal-seeking in nature.

An algorithm based on fuzzy relational models, which is not an alternative to the well-known algorithms proposed by Mamdani, Larsen, Tsukamoto, is proposed. This algorithm is essentially a modified version of the mechanism of fuzzy logic inference at the rules activation stage and can be used in conjunction with the above mentioned algorithms. In using this algorithm, a fuzzy correspondence between the input and output fuzzy variables is established. In this case, there is no need of linking to any of fuzzy implication operations, and it becomes possible to modify the fuzzy inference result by changing not only the term membership functions of input and output linguistic variables, but also the elements of fuzzy correspondence.

The main factors influencing the dynamic properties of a fuzzy logic controller are formulated, and recommendations on using each of these factors in adjusting the controller are worked out. The conditions under which it is advisable to adapt a fuzzy controller to the changing parameters of a controlled plant are determined.

The membership functions and the rule bases for the fuzzy inference algorithms that ensure high-quality performance of the system for controlling a plant with varying parameters in a sufficiently wide input signal frequency band are drawn up.

The system simulation results are presented, which demonstrate that addition of a supplementary supervisory loop opens the possibility to maintain the system operability and to ensure acceptable control quality indicators of an unsteady dynamic object.

Key words: software-defined networking, corporate computer networks, adaptive control mechanism, priority users.

For citation: Anisimov D.N., Mai The Anh A Two-Level Fuzzy System for Control of Dynamic Objects. MPEI Vestnik. 2017; 4: 101—109. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-101-109.

Постановка задачи исследования

Для многих систем автоматического управления характерно изменение параметров объекта во времени, и в процессе функционирования первоначальные настройки регулятора перестают обеспечивать требуемые показатели качества системы. Это обстоятельство привело к бурному развитию адаптивных систем автоматического управления (АДСУ), в которых помимо основного (исполнительного) контура присутствует также супервизорный контур, выполняющий подстройку параметров регулятора при изменении условий функционирования системы. К настоящему времени предложено большое количество вариантов построения АДСУ [1]. Одна из наиболее общих функциональных схем приведена на рис. 1.

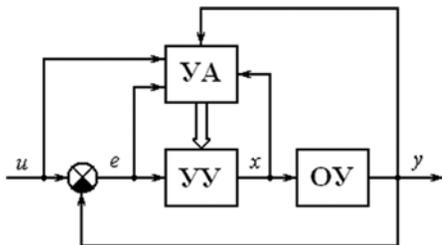


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной системы управления:

ОУ — объект управления; УУ — управляющее устройство (регулятор); УА — устройство адаптации (супервизор)

Развитие технологий мягких вычислений обусловило дальнейший рост многообразия структур АДСУ. Как на исполнительном, так и на супервизорном уровне могут использоваться «классические», нечеткие, нейросетевые и прочие алгоритмы. В качестве примеров можно назвать такие сочетания «управляющее устройство – устройство адаптации» как «ПИД-регулятор – нечеткий супервизор», «нечеткий регулятор – нейросетевой супервизор» (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS), «нейросетевой регулятор – нейросетевой супервизор», «нечеткий регулятор – генетический алгоритм».

Предложена двухуровневая нечеткая система, в которой как устройство управления, так и устройство адаптации реализуются на основе алгоритмов нечет-

кого логического вывода. Нечеткие логические регуляторы получили достаточно широкое распространение с конца 70-х гг. прошлого века в задачах управления сложными объектами. Тем не менее, их настройка до сих пор носит преимущественно эвристический характер. Предложен подход к настройке НЛР, основанный на комплексных исследованиях его статических и динамических характеристик. Результаты исследований представлены в [2].

В зависимости от назначения системы автоматического управления пользуются теми или иными показателями качества. Чаще всего учитываются такие показатели как время регулирования, максимальное перерегулирование, статическая, кинетическая, динамическая ошибки. Зависимости показателей качества от параметров объекта и регулятора имеют сложный нелинейный характер и при синтезе систем обычно рассматривают их приближенные оценки. Поэтому для автоматической подстройки регулятора представляется целесообразным также использовать аппарат нечеткой логики.

Исполнительный контур системы

При построении систем, основанных на нечетких логических выводах, наибольшее распространение получили алгоритмы Мамдани [3], Ларсена [4], Цукamoto [5], Сугено – Такаги [6], а также реляционные модели [7].

В настоящем исследовании выбран алгоритм на основе нечетких реляционных моделей. Он не является альтернативой перечисленным выше, а может использоваться совместно с ними и представляет собой модификацию механизма нечеткого логического вывода на этапе активизации правил. При использовании данного алгоритма устанавливается нечеткое соответствие между входными и выходными нечеткими переменными. При этом отпадает необходимость привязки к какой-либо из операций нечеткой импликации и появляется возможность влиять на результат нечеткого вывода, меняя не только функции принадлежности термов входных и выходных лингвистических переменных, но и элементы нечеткого соответствия.

На рис. 2 приведена структурная схема исполнительного контура, представляющего собой нижний уровень системы управления. Устройство управления

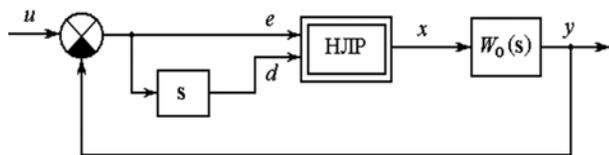


Рис. 2. Исполнительный контур нечеткой системы управления

(УУ) представляет собой НЛР с двумя входами и одним выходом. Здесь u, y — сигналы на входе и выходе системы; e, d — сигналы рассогласования и его производной, поступающие на НЛР. На его выходе вырабатывается сигнал управления x , подаваемый на объект с передаточной функцией $W_0(s)$.

Для описания НЛР были введены лингвистические переменные: «Рассогласование», T_E, E , «Производная», T_D, D , «Управление», T_X, X , где $E = [-E_m; E_m]$; $D = [-D_m; E_m]$; $X = [-X_m; X_m]$ — области определения; $T_E = \{T_E^1, T_E^2, T_E^3\} = \{“N”, “Z”, “P”\}$; $T_D = \{T_D^1, T_D^2, T_D^3\} = \{“N”, “Z”, “P”\}$; $T_X = \{T_X^1, T_X^2, T_X^3\} = \{“N”, “Z”, “P”\}$ — терм-множества. Здесь и далее нечеткие переменные « N », « Z », « P » интерпретируются как «отрицательное», «около нуля» и «положительное».

На основании исследований, проведенных для объекта 2-го порядка с передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{K_0}{s(1 + sT_0)}, \quad (1)$$

были выявлены следующие основные факторы, влияющие на динамические свойства НЛР [8—10]:

- количество термов входных и выходных переменных;
- вид функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных;
- характер нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений (база правил) [11];
- способ дефаззификации;
- выбор логического базиса, который определяется треугольными нормами (T -нормами) и конормами (S -нормами) [12, 13];
- влияние степеней значимости подусловий в предпосылках при их агрегировании [14].

Перечисленные факторы свидетельствуют о том, что количество степеней свободы при построении нечеткой системы управления достаточно велико. С одной стороны, это свойство обеспечивает гибкость настройки НЛР. С другой стороны, большое количество сочетаний этих факторов затрудняет поиск рационального решения задачи настройки регулятора. Анализ статических, частотных и временных характеристик нечеткой системы управления, проведенный в работах [2, 8—10, 12—14], позволил выработать следующие рекомендации по использованию каждого из этих факторов при настройке НЛР.

1. Выбор входных и выходных переменных, а также количества их термов следует осуществлять, исходя из структуры системы управления и требований к ее качеству, избегая их необоснованного увеличения.

2. Логический базис нужно выбирать на этапе проектирования системы и не менять в процессе ее функционирования. При этом алгебраический базис обеспечивает наименьшие нелинейные искажения характеристик НЛР, что делает его поведение достаточно предсказуемым. С другой стороны, поверхность управления НЛР при использовании максиминного базиса имеет ощутимое уменьшение наклона вблизи начала координат, что усиливает стабилизирующие свойства регулятора.

3. Степени растяжения-сжатия функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных, и диапазоны их изменения позволяют плавно варьировать характер процессов в системе управления в широких пределах. При настройке этих параметров следует учитывать следующие соображения.

При растяжении функций принадлежности крайних термов и сжатии функции принадлежности центрального терма той или иной входной лингвистической переменной увеличивается преимущественно влияние соответствующего входа НЛР (т. е. для переменной «Рассогласование» — пропорционального входа, для переменной «Производная» — дифференцирующего). Аналогичный эффект оказывает сужение диапазонов функций принадлежности термов входных лингвистических переменных.

При растяжении функций принадлежности крайних термов и сжатии функции принадлежности центрального терма выходной лингвистической переменной увеличивается общий коэффициент усиления НЛР. Фаза выходного сигнала при этом не меняется. Такое же воздействие оказывает расширение диапазонов функций принадлежности термов выходной лингвистической переменной.

Таким образом, как степени растяжения-сжатия функций принадлежности, так и диапазоны их изменения могут быть использованы для автоматической подстройки регулятора в режиме нормальной эксплуатации. Следует учитывать, что изменение формы функций принадлежности требует существенно большего времени вычислений, а это в некоторых реальных системах управления может оказаться неприемлемым. С другой стороны, сужение диапазонов изменения функций принадлежности термов лингвистических переменных приводит к тому, что входные сигналы НЛР быстрее достигают насыщения, т. е. снижаются возможности управления объектом при больших значениях сигнала рассогласования системы и его производной.

4. Нечеткое соответствие между пространством предпосылок и пространством заключений (базу пра-

вил) желательно настроить в тестовом режиме, до начала эксплуатации системы, и в дальнейшем его не трогать.

5. Дефаззификацию целесообразно осуществлять методом центра тяжести.

6. Степени значимости подусловий могут быть использованы для автоматической подстройки регулятора в тех случаях, когда параметры объекта управления в процессе функционирования меняются не более чем на один порядок.

Как было отмечено выше, данные рекомендации были выработаны на основе анализа системы управления достаточно простым объектом. Система является структурно устойчивой, периодические режимы в ней исключены [15].

Изложенные рекомендации остаются справедливыми и для более сложных объектов. В частности, применим их по отношению к контуру управления расходом питательной воды парогенератора барабанного типа с нечетким регулятором [16]. Объект управления описывается передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{K_o(1 - T_1s)}{s(1 + T_2s)(1 + T_3s)}. \quad (2)$$

Значения коэффициента усиления и постоянных времени обычно задаются приблизительно на основе теоретических расчетов. В процессе работы системы они могут меняться.

Супервизорный контур системы

При существенных изменениях параметров объекта управления часто оказывается необходимым принятие мер, направленных на отслеживание режимов работы системы и подстройку параметров регулятора. Устройство, выполняющее эти задачи, чаще всего реализуется программно и во многих источниках именуется «супервизором». В качестве примера построения двухуровневой системы рассмотрим систему управления объектом, описываемым передаточной функцией (2).

Перед началом эксплуатации системы целесообразно предварительно ее настроить, если допустима подача тестовых сигналов на входы. В этом случае в качестве критериев выберем такие хорошо проверенные на практике показатели, как время регулирования t_p и максимальное перерегулирование σ . При этом предположим, что заданные показатели качества соответствуют допустимым значениям динамической погрешности в рабочей полосе частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$. В качестве параметров НЛР, подлежащих подстройке, используем диапазоны изменения функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных «Рассогласование» E_m и «Производная» D_m . При этом форму функций принадлежности оставим фиксированной.

Работа супервизорного контура осуществляется в режиме нормальной эксплуатации системы, когда по-

дача тестовых сигналов нежелательна. В этом случае ведется наблюдение за сигналами на входе системы $u(t)$, ошибки системы (рассогласованием) $e(t)$ и его производной $d(t) = \dot{e}(t)$. Если отношение среднего модуля ошибки к среднему модулю входного сигнала $eu(t, \tau)$ в течение заданного интервала времени τ превышает допустимое значение eu_{\max} или становится ниже установленного значения eu_{\min} в высокочастотной области входных сигналов, т. е.

$$eu(t, \tau) = \frac{\int_{t-\tau}^t |e(\vartheta)| d\vartheta}{\int_{t-\tau}^t |u(\vartheta)| d\vartheta} > eu_{\max} \quad (3)$$

или

$$eu(t, \tau) = \frac{\int_{t-\tau}^t |e(\vartheta)| d\vartheta}{\int_{t-\tau}^t |u(\vartheta)| d\vartheta} < eu_{\min} \quad (4)$$

при

$$du(t, \tau) = \frac{\int_{t-\tau}^t |d(\vartheta)| d\vartheta}{\int_{t-\tau}^t |u(\vartheta)| d\vartheta} > du_{\max},$$

то необходимо осуществить подстройку величин E_m и D_m . Здесь следует пояснить смысл неравенств (4). Обычно считается, что если в процессе функционирования системы средний модуль ошибки уменьшается, то никаких действий предпринимать не надо. Однако уменьшение динамической ошибки на высоких частотах наиболее часто бывает обусловлено увеличением коэффициента усиления объекта, а это, как правило, приводит к снижению запаса устойчивости системы. О частоте сигнала рассогласования может косвенно свидетельствовать отношение среднего значения модуля его производной, домноженного на нормировочный коэффициент η , к среднему значению модуля входного сигнала $du(t, \tau)$. Коэффициент η имеет размерность времени. С точки зрения работоспособности системы, его выбор не принципиален, но для удобства составления базы правил желательно выбирать его таким образом, чтобы диапазоны изменения величин $du(t, \tau)$ и $eu(t, \tau)$ были примерно одинаковыми.

Управление диапазонами изменения функций принадлежности E_m и D_m можно осуществлять двумя способами: задавать либо непосредственно их значения, либо их приращения относительно предыдущих значений — δE_m и δD_m . Второй способ более предпочтителен, поскольку при этом отпадает необходимость привязки к параметрам объекта, которые к тому же не всегда бывают известны. Для сохранения равномерности базовых шкал эти приращения удобнее задавать в децибелах: увеличение диапазона в 10 раз соответству-

ет его изменению на +20 дБ, уменьшение в 10 раз — изменению на -20 дБ.

Алгоритм предварительной настройки НЛР опишем с помощью входных лингвистических переменных $CT = \langle \text{«Время регулирования»}, T_{CT}, CT_{def} \rangle$; $OC = \langle \text{«Максимальное перерегулирование»}, T_{OC}, OC_{def} \rangle$ и выходных переменных $DE = \langle \text{«Изменение диапазона } E_m \rangle$, T_{DE}, DE_{def} ; $DD = \langle \text{«Изменение диапазона } D_m \rangle$, T_{DD}, DD_{def} , где $CT_{def} = [-0; 4] c$; $OC_{def} = [0; 40] \%$; $DE_{def} = [-20; 20] дБ$; $DD_{de} = [-20; 20] дБ$ — области определения; $T_{CT} = \{T_{CT}^1, T_{CT}^2, T_{CT}^3\} = \{«S», «M», «B»\}$; $T_{OC} = \{T_{OC}^1, T_{OC}^2, T_{OC}^3\} = \{«S», «M», «B»\}$; $T_{DE} = \{T_{DE}^1, T_{DE}^2, T_{DE}^3\} = \{«N», «Z», «P»\}$; $T_{DD} = \{T_{DD}^1, T_{DD}^2, T_{DD}^3\} = \{«N», «Z», «P»\}$ — терм-множества. Нечеткие переменные «S», «M», «B — «малое», «среднее», «большое». Функции принадлежности термов лингвистических переменных изображены на рис. 3.

Базу правил представим в виде табл. 1, которая представляет собой реляционные матрицы управляющих решений по изменению диапазонов функций

принадлежности термов лингвистических переменных «Рассогласование» (DE) и «Производная» (DD). Числовые значения — степени уверенности в принятии того или иного управляющего решения, могут меняться в пределах от 0 до 1. Изначально они задаются на основе экспертных знаний, затем могут быть скорректированы по результатам моделирования системы.

При описании супервизора в режиме нормального функционирования системы выходные лингвистические переменные оставим прежними, а в качестве входных используем переменные, характеризующие динамическую ошибку системы: $EU = \langle \text{«Средний модуль рассогласования»}, T_{EU}, EU_{def} \rangle$ и $DU = \langle \text{«Средний модуль производной рассогласования»}, T_{DU}, DU_{def} \rangle$, где $T_{EU} = \{T_{EU}^1, T_{EU}^2, T_{EU}^3\} = \{«S», «M», «B»\}$; $EU_{def} = [0; 10] \%$; $T_{DU} = \{T_{DU}^1, T_{DU}^2, T_{DU}^3\} = \{«S», «M», «B»\}$; $DU_{de} = [0; 10] \%$.

Функции принадлежности входных термов лингвистических переменных супервизора на этом этапе настройки изображены на рис. 4.

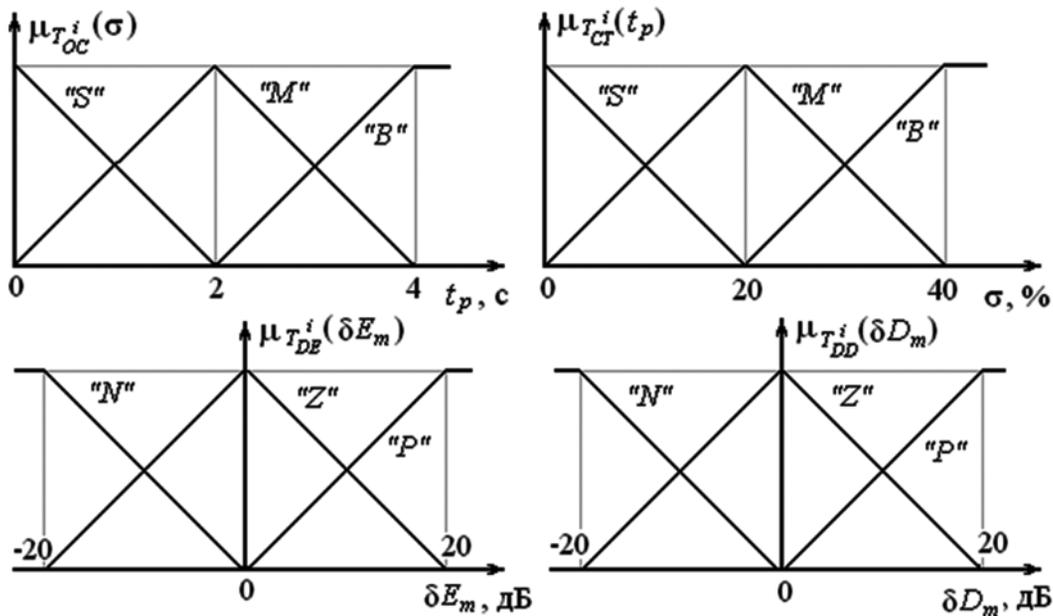


Рис. 3. Функции принадлежности входных и выходных термов лингвистических переменных супервизора на предварительном этапе настройки

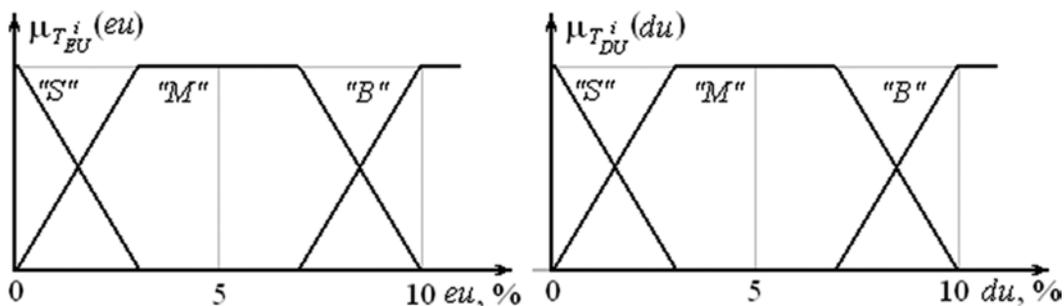


Рис. 4. Функции принадлежности входных и выходных термов лингвистических переменных супервизора на первом этапе настройки

Таблица 1

Базы правил алгоритма нечеткого логического вывода для изменения диапазонов функций принадлежности термов лингвистических переменных на этапе предварительной настройки НЛР

<i>CT</i>	<i>OC</i>	<i>DE = "N"</i>	<i>DE = "Z"</i>	<i>DE = "P"</i>
«Рассогласование»				
<i>S</i>	<i>S</i>	0	0,7	0,4
<i>S</i>	<i>M</i>	0	0,7	0,4
<i>S</i>	<i>B</i>	0	0,4	0,7
<i>M</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>M</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>B</i>	0,2	0,9	0
<i>B</i>	<i>S</i>	1	0	0
<i>B</i>	<i>M</i>	1	0	0
<i>B</i>	<i>B</i>	0,5	0,5	0
«Производная»				
<i>S</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>S</i>	<i>M</i>	0,5	0,5	0
<i>S</i>	<i>B</i>	0,9	0,2	0
<i>M</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>M</i>	0,4	0,7	0
<i>M</i>	<i>B</i>	0,9	0,2	0
<i>B</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>B</i>	<i>M</i>	0,5	0,5	0
<i>B</i>	<i>B</i>	1	0	0

Таблица 2

Базы правил алгоритма нечеткого логического вывода для изменения диапазонов функций принадлежности термов лингвистических переменных в режиме нормального функционирования системы

<i>EU</i>	<i>DU</i>	<i>DE = "N"</i>	<i>DE = "Z"</i>	<i>DE = "P"</i>
«Рассогласование»				
<i>S</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>S</i>	<i>M</i>	0	0,8	0,2
<i>S</i>	<i>B</i>	0	0,3	0,9
<i>M</i>	<i>S</i>	0,5	0,5	0
<i>M</i>	<i>M</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>B</i>	0	1	0
<i>B</i>	<i>S</i>	1	0	0
<i>B</i>	<i>M</i>	0,8	0,2	0
<i>B</i>	<i>B</i>	0,6	0,4	0
«Производная»				
<i>S</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>S</i>	<i>M</i>	0	0,8	0,2
<i>S</i>	<i>B</i>	0	0,3	0,7
<i>M</i>	<i>S</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>M</i>	0	1	0
<i>M</i>	<i>B</i>	0	1	0
<i>B</i>	<i>S</i>	0,7	0,3	0
<i>B</i>	<i>M</i>	0,6	0,4	0
<i>B</i>	<i>B</i>	0,5	0,5	0

Трапецеидальная форма функций принадлежности центральных термов выбрана для снижения чувствительности супервизора, т.е. недопущения изменения настроек НЛР при незначительных изменениях параметров объекта.

Базы правил представлены в табл. 2.

Результаты моделирования

Было проведено компьютерное моделирование двухуровневой нечеткой системы управления динамическим объектом, описываемым передаточной функцией (2), и поставлены основные задачи:

- анализ показателей качества системы при изменении параметров объекта управления;
- коррекция критериев принятия решений о необходимости подстройки величин E_m и D_m ;
- коррекция базы знаний алгоритмов нечеткого вывода, обеспечивающих работу как исполнительного, так и супервизорного контура двухуровневой нечеткой системы управления.

Результаты моделирования позволили сделать вывод о том, что при произвольных значениях параметров НЛР показатели качества системы могут оказаться неудовлетворительными. Более того, в ней могут возникнуть автоколебания (рис. 5, а). Как показал анализ автоколебаний методом гармонического баланса [15], от них можно избавиться либо уменьшая пропорциональную составляющую НЛР, либо увеличивая его дифференциальную составляющую. В данном случае правила, приведенные в табл. 1, предписывают супервизору уменьшить диапазон D_m , что приводит к уси-

нию дифференцирующих свойств НЛР. Как видно из рис. 5, б, время регулирования и максимальное пере-регулирование переходного процесса после предварительной настройки НЛР соответствуют требуемым значениям.

При моделировании системы в режиме нормальной эксплуатации на вход НЛР подавались синусоидальные сигналы в диапазоне частот от 0,0314 до 3,14 рад/с. Показано, что если параметры объекта остаются постоянными, то динамическая ошибка системы изменяется в пределах от 1 до 10%, т.е. соответствует заданным значениям. Если же параметры объекта отклоняются от первоначальных в ту или иную сторону, могут устанавливаться нежелательные режимы работы системы, которые в данном случае заключаются либо в недопустимом увеличении динамической ошибки, либо в возникновении автоколебаний. На основе моделирования осуществлены, во-первых, коррекция критериев принятия решений о необходимости подстройки величин E_m и D_m , в результате которой наиболее удачными были признаны критерии, определяемые выражениями (3) и (4); во-вторых, коррекция базы знаний алгоритма нечеткого вывода, реализующего супервизор (см. табл. 2).

На рис. 6 изображены графики модуля динамической ошибки в системах без супервизора и с супервизором при скачкообразных изменениях коэффициента усиления объекта.

В момент времени $t_1 = 30$ с коэффициент усиления объекта K_0 уменьшается в 2 раза — с 0,25 до $0,125 \frac{\text{м/с}}{\text{м}^3/\text{с}}$.

При этом увеличивается динамическая ошибка систе-

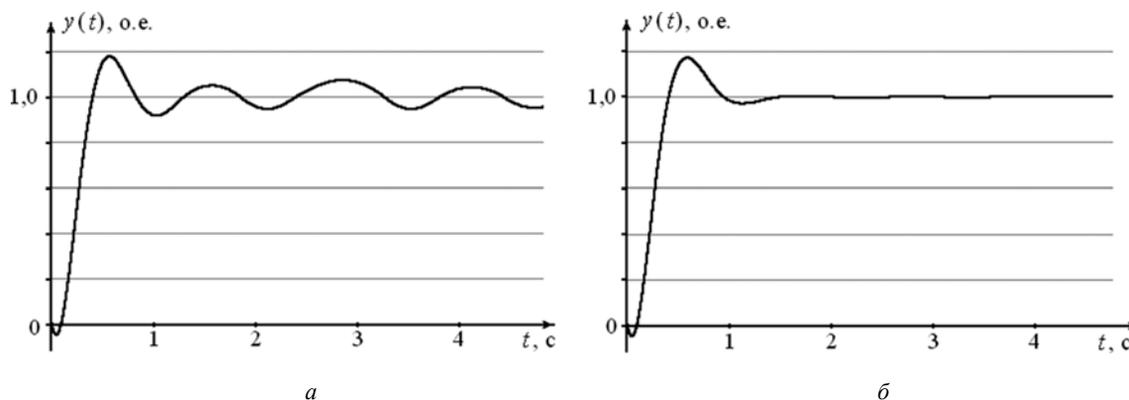


Рис. 5. Переходные процессы в системе с произвольными параметрами НЛР (а) и полученными с помощью супервизора на этапе предварительной настройки (б)

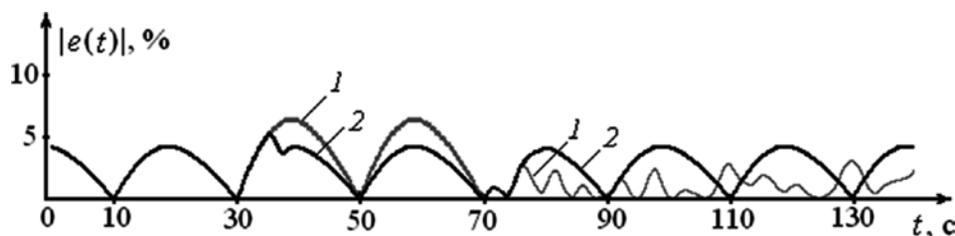


Рис. 6. Графики модуля динамической ошибки в системах без супервизора (кривая 1) и с ним (кривая 2)

мы. Супервизор анализирует усредненное за время τ значение модуля ошибки $|e(t)|$ и его производной $|d(t)|$. В данной системе величина $\tau = 2$ с. Далее проводится подстройка параметров НЛР E_m и D_m , и ошибка системы возвращается в прежние пределы. В момент времени $t_1 = 90$ с коэффициент K_0 увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным значением – до $0,5 \frac{\text{м/с}}{\text{м}^3/\text{с}}$. Динами-

ческая ошибка уменьшается, но уменьшается также и запас устойчивости системы. В данном случае это сразу становится заметным по наличию автоколебаний. Супервизор отслеживает и эту ситуацию, подстраивая параметры НЛР под изменившиеся параметры объекта. Таким образом, введение в систему дополнительного супервизорного контура позволяет сохранять требуемые показатели качества системы управления в заданных пределах при изменениях параметров объекта.

Заключение

Разработана двухуровневая система управления нестационарным динамическим объектом, состоящая из исполнительного и супервизорного контуров, реализованных на основе алгоритмов нечеткого логического вывода. Основным отличием данной системы от аналогичных систем, построенных с использованием технологий мягких вычислений, заключается в том, что она базируется на комплексных исследованиях статических и динамических характеристик нечеткого логического регулятора как элемента системы автоматического управления. Это позволило, во-первых, оценить влияние тех или иных факторов на динамические свойства регулятора; во-вторых, выбрать те настройки, которые могут быть наиболее эффективно использованы при построении супервизорного контура; в-третьих, сделать более целенаправленным поиск управляющих решений, обеспечивающих требуемые показатели качества системы управления.

Обоснован выбор алгоритма логического вывода на основе нечетких реляционных моделей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00054-а).

Литература

1. **Воронов А.А.** Основы теории автоматического управления: автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. М.: Энергия, 1980.
2. **Анисимов Д.Н., Май Тхе Ань.** Динамические свойства нечетких систем управления, построенных на основе реляционных моделей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 5.
3. **Mamdani E.H., Assilian S.** An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. V. 7. No. 1. Pp. 1—13.
4. **Larsen P.M.** Industrial Applications of Fuzzy Logic Control // Int. J. Man-Machine Studies. 1980. V. 12. No. 1. Pp. 3—10.

5. **Tsukamoto Y.** An Approach To Fuzzy Reasoning Method // An Approach to Fuzzy Reasoning Method. Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. North-Holland, Amsterdam, 1979. Pp. 137—149.

6. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1985. V. 15. No. 1. Pp. 116—132.

7. **Pedrycz W.** Fuzzy Control and Fuzzy Systems. N.-Y.: John Wiley and Sons, 1993.

8. **Анисимов Д.Н., Дроздова Е.Д., Новиков В.Н.** Исследование свойств нечеткого аппроксимирующего ПД-регулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 6—12.

9. **Анисимов Д.Н., Май Тхе Ань, Новиков В.Н., Федорова Е.В.** Исследование процессов в системах автоматического управления, основанных на нечетком логическом выводе // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне. Пенза, 2015. С. 3—5.

10. **Анисимов Д.Н., Май Тхе Ань.** Моделирование процессов в нечетких системах управления // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XV Междунар. науч.-метод. конф. Воронеж, 2015. С. 374—378.

11. **Анисимов Д.Н., Ситников К.Ю.** Методика построения нечетких реляционных систем автоматического управления // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 77—82.

12. **Анисимов Д.Н., Новиков В.Н., Сафина Э.А., Ситников К.Ю.** Исследование влияния выбора логического базиса на характеристики нечеткого регулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8 (149). С. 12—17.

13. **Анисимов Д.Н., Новиков В.Н., Сафина Э.А.** Исследование влияния треугольных норм на динамику нечеткой системы автоматического управления // Вестник МЭИ. 2013. № 4. С. 186—192.

14. **Анисимов Д.Н., Дроздова Е.Д., Новиков В.Н.** Исследование влияния степеней значимости подусловий на динамические характеристики нечеткого логического регулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 6. С. 363—368.

15. **Анисимов Д.Н., Май Тхе Ань.** Анализ автоколебаний в нечетких системах управления // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XVII Междунар. конф. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2017.

16. **Anisimov D.N., Mai The Anh.** Design of Fuzzy System for Control of Water Level in a Boiler Drum // Proc Int. Academic Forum AMO – SPITSE – NESEFF. Smolensk: Publishing Universum, 2016.

References

1. **Voronov A.A.** Osnovy Teorii Avtomaticheskogo Upravleniya: Avtomaticheskoe Regulirovanie Nepreryvnyh Lineynyh Sistem. M.: Energiya, 1980. (in Russian).

2. **Anisimov D.N., Mai The Anh.** Dinamicheskie Svoystva Nechetkih Sistem Upravleniya, Postroenny na Osnove Relyatsionnyh Modele. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2017;18;5. (in Russian)

3. **Mamdani E.H., Assilian S.** An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller. Int. J. Man-Machine Studies. 1975;7;1:1—13.

4. **Larsen P.M.** Industrial Applications of Fuzzy Logic Control. Int. J. Man-Machine Studies. 1980;12;1:3—10.

5. **Tsukamoto Y.** An Approach To Fuzzy Reasoning Method. An Approach to Fuzzy Reasoning Method. Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. North-Holland, Amsterdam, 1979:137—149.

6. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1985;15;1:116—132.

7. **Pedrycz W.** Fuzzy Control and Fuzzy Systems. N.-Y.: John Wiley and Sons, 1993.

8. **Anisimov D.N., Drozdova E.D., Novikov V.N.** Issledovanie Svoystv Nechetkogo Approksimiruyushchego PD Regulyatora. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2014;9;6—12. (in Russian).

9. **Anisimov D.N., Mai The Anh., Novikov V.N., Fedorova E.V.** Issledovanie Protssosov v Sistemah Avtomaticheskogo Upravleniya, Osnovannyh na Nechetkom Logicheskom Vyvode. Problemy Avtomatizatsii i Upravleniya v Tekhnicheskikh Sistemah: Sb. Statey Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf., Posvyashchennoy 70-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy Voyne. Penza, 2015:3—5. (in Russian).

10. **Anisimov D.N., Mai The Anh.** Modelirovanie Protssosov v Nechetkih Sistemah Upravleniya. Informatika: Problemy, Metodologiya, Tekhnologii: Materialy XV Mezhdunar. Nauch.-metod. Konf. Voronezh, 2015:374—378. (in Russian).

11. **Anisimov D.N., Sitnikov K.Yu.** Metodika Postroeniya Nechetkih Relyatsionnyh Sistem Avtomaticheskogo Upravleniya. MPEI Vestnik. 2012;3:77—82. (in Russian).

12. **Anisimov D.N., Novikov V.N., Safina E.A., Sitnikov K.Yu.** Issledovanie Vliyaniya Vybor Logicheskogo Bazisa na Harakteristiki Nechetkogo Regulyatora. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2013;8 (149):12—17. (in Russian).

13. **Anisimov D.N., Novikov V.N., Safina E.A.** Issledovanie Vliyaniya Treugol'nyh Norm na Dinamiku Nechetkoy Sistemy Avtomaticheskogo Upravleniya. MPEI Vestnik. 2013;4:186—192. (in Russian).

14. **Anisimov D.N., Drozdova E.D., Novikov V.N.** Issledovanie Vliyaniya Stepenev Znachimosti Podusloviy na Dinamicheskie Harakteristiki Nechetkogo Logicheskogo Regulyatora. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2015;16;6:363—368. (in Russian).

15. **Anisimov D.N., Mai The Anh.** Analiz avtokolebaniy v Nechetkih Sistemah Upravleniya. Informatika: Problemy, Metodologiya, Tekhnologii: Materialy XVII Mezhdunar. Konf. Voronezh: Izd-vo VGU, 2017. (in Russian).

16. **Anisimov D.N., Mai The Anh.** Design of Fuzzy System for Control of Water Level in a Boiler Drum. Proc Int. Academic Forum AMO – SPITSE – NESEFF. Smolensk: Publishing Universum, 2016.

Сведения об авторах

Анисимов Дмитрий Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: anisimovdn@mpei.ru

Май Тхе Ань — аспирант кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: theanh46k@gmail.com

Information about authors

Anisimov Dmitriy N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: anisimovdn@mpei.ru

Mai The Anh — Ph.D.-student of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: theanh46k@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.11.2016