

Управление процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации

А.М. Джамбеков^а, И.А. Щербатов^б

Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева 16, Астрахань, Россия

^аAzamat-121@mail.ru, ^бsherbatov2004@mail.ru

Статья поступила 27.08.2014, принята 5.11.2014

В работе сформулирована задача управления блоком стабилизации катализатора процесса каталитического риформинга на основе экспертной информации. Проведенный обзор литературы по математическим моделям процесса каталитического риформинга позволяет сделать вывод о необходимости построения математической модели риформинга, учитывающей как количественные параметры (температура, давление, расход материальных потоков), так и величины, представляемые оператором в виде лингвистических переменных (активность катализатора, качество топливного газа и т. д.). Общей проблемой построения модели каталитического риформинга является отсутствие учета неизмеримых возмущений и изменения параметров состояния объекта. Для повышения эффективности управления процессом стабилизации катализатора риформинга разработана система регулирования температуры куба колонны на базе нечеткой логики. Для нахождения диапазонов изменения лингвистических переменных нечеткой системы управления была исследована существующая временная зависимость температуры продукта на выходе печи подогрева, которая идентична по своим характеристикам исследуемой печи. Произведен расчет нечеткого регулятора системы управления, произведена фаззификация значений выделенных лингвистических переменных, построены две системы регулирования температуры куба колонны (система с цифровым ПИД-регулятором и система с цифровым нечетким регулятором). Сравнительный анализ переходных процессов в данных системах показал наличие ряда преимуществ нечеткого регулятора.

Ключевые слова: каталитический риформинг, стабилизационная колонна, нечеткий регулятор, лингвистическая переменная, система нечеткого вывода.

Control of catalytic reforming process based on expert information

A.M. Dzhambekov^а, I.A. Sherbatov^б

Astrakhan State Technical University; 16, Tatisheva St., Astrakhan, Russia

^аAzamat-121@mail.ru, ^бsherbatov2004@mail.ru

Received 27.08.2014, accepted 5.11.2014

The article deals with the problem of controlling a stabilization unit of the catalysate in catalytic reforming process based on expert information. A review of the literature on mathematical models of catalytic reforming process leads to the conclusion about the necessity of constructing a reforming mathematical model taking into account both the quantitative parameters (temperature, pressure, material flow rate) and the values submitted by an operator in the form of linguistic variables (catalyst activity, quality of fuel gas etc.). A general problem of constructing a catalytic reforming model is the lack of accounting for unmeasured disturbances and changes of state parameters of an object. To enhance the efficiency of controlling the process of stabilization reforming catalysate the temperature controlling system for a column cube has been developed on the basis of fuzzy logic. To find the range of changes for the linguistic variables of a fuzzy control system the time dependence of the current product temperature at the outlet of the heating furnace, which is identical to the furnace in its characteristics, has been studied. The calculation of fuzzy controller in control system has been worked out. Fuzzification for the values of selected linguistic variables has been done. Two temperature control systems for a column cube (a system with digital PID control and a system with digital fuzzy control) have been constructed. Comparative analysis of transient processes in these systems has revealed several advantages of fuzzy controller.

Key words: catalytic reforming, stabilization column, fuzzy controller, linguistic variable, fuzzy inference system.

Введение. В настоящее время большинство производственных установок функционирует в условиях неопределенности как самого объекта, так и действующих на него неконтролируемых возмущающих воздействий. Одним из таких является установка каталитического риформинга. Использование сложных ма-

тематических моделей процесса риформинга, как правило, оказывается неэффективным при разработке оптимальной системы управления процессом [1] ввиду нестационарности процесса [2]. Поэтому большинство служб контроля установки каталитического риформинга ограничивается применением локальных автомати-

ческих систем регулирования. Наличие высококвалифицированного оператора на установке является одним из обязательных условий ее надежной работы. Накопленные оператором знания о настройке параметров оборудования могут служить основой для построения гибких интеллектуальных систем управления процессом [3]. Одной из проблем, с которой сталкиваются при построении моделей каталитического риформинга, является наличие качественных показателей (качество сырья, активность катализатора, качество топливного газа, состояние трубчатых печей). Поэтому необходимо использовать такой метод моделирования, который допускает использование качественных знаний экспертов [4]. Одной из теорий, позволяющей строить модели управления на основе качественной информации об объекте, является теория нечетких множеств и нечеткой логики [5]. Целью данной работы является повышение эффективности управления процессом каталитического риформинга за счет разработки интеллектуальной системы управления данным процессом.

Объектом исследования в данной работе является стабилизационная колонна установки каталитического риформинга. Необходима разработка нечеткой системы регулирования основных параметров стабилизационной колонны, которая будет учитывать опыт экспертов — наладчиков данной установки. Температура выходного потока (стабильного катализата) стабилизационной колонны является наиболее значимым показателем, который используют при анализе характеристик продукта каталитического риформинга. Поэтому остановимся на нечетком регулировании температуры куба колонны риформинга.

Краткое описание технологической установки.

В стабилизационную колонну К-2 с реакторов риформинга подается нестабильный катализат, основным компонентом которого является бензиновая фракция (рис. 1). С верха К-2 выводятся газы стабилизации и пары нестабильной головки, далее они конденсируются и направляются в емкость орошения Е-2 для сепарации.

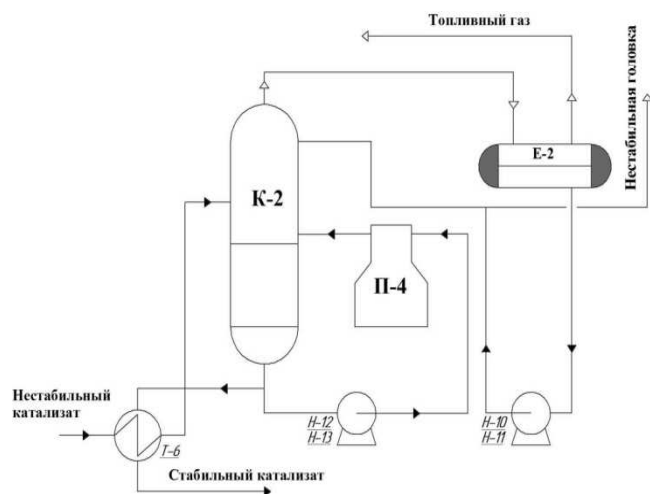


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема блока стабилизации установки риформинга

Газ стабилизации из Е-2 сбрасывается в топливную сеть комплекса, жидкая фаза — нестабильная головка — возвращается в колонну К-2 в качестве орошения насосом Н-10. Необходимое для стабилизации количество тепла вводится в К-2 циркуляцией стабильного катализата через печь П-4. Балансовое количество стабильного катализата с низа К-2, охлаждаясь, выводится из установки в парк компаундирования бензина [6].

Анализ процесса как объекта управления. С учетом реальной работы аппарата все существенные факторы, влияющие на процесс, можно разбить на следующие группы [7]:

- *возмущения, допускающие стабилизацию.* К ним относятся независимые технологические переменные, которые допускают существенные колебания, но могут быть стабилизированы с помощью АСР. К таким переменным обычно относятся некоторые показатели входных потоков;

- *контролируемые возмущения.* К ним условно относят те возмущения, которые можно измерить, но недопустимо стабилизировать: расход питания, подаваемого непосредственно из предыдущего аппарата, и т. п.;

- *неконтролируемые возмущения.* К ним относятся те возмущения, которые невозможно или нецелесообразно измерять непосредственно: изменение коэффициентов тепло- и массопередачи;

- *возможные регулирующие воздействия.* Это энергетические, материальные и тепловые потоки, которые можно изменять автоматически для поддержания регулируемых параметров;

- *выходные переменные.* Из их числа выбирают регулируемые координаты. В их качестве обычно выбирают технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального и теплового баланса в аппарате. К ним относятся: уровень жидкости (показатель баланса по жидкой фазе), давление (показатель баланса по газовой фазе), температура (показатель теплового баланса в аппарате), концентрация (показатель материального баланса по компоненту).

Проведем анализ стабилизационной колонны К-2 как объекта управления (рис. 2) с целью выявления параметров вышеперечисленных видов (табл. 1).



Рис. 2. Анализ стабилизационной колонны К-2 как объекта управления

Таблица 1

Параметры стабилизационной колонны К-2

Регулирующие воздействия	Регулируемые параметры	Контролируемые возмущающие воздействия	Неконтролируемые возмущающие воздействия
расход топливного газа $F_{ТГ}$	уровень в кубе колонны L_K	расход нестабильного катализата $F_{Н.К}$	состав нестабильного катализата $G_{Н.К}$
расход орошения $F_{Орош}$	температура в кубе колонны T_K	температура нестабильного катализата $T_{Н.К}$	тепловые потери в окружающую среду $T_{П}$
расход отводимого стабильного катализата $F_{С.К}$	температура верха колонны T_B	температура орошения $T_{Орош}$	
	концентрация бугана в стабильном катализате Q_B		

Краткий обзор существующих математических моделей каталитического риформинга. Математические модели каталитического риформинга можно разделить на две группы: аналитические модели, построенные на основе теоретического анализа физико-химических процессов, протекающих в исследуемом объекте; эмпирические модели, разработанные для конкретных объектов управления [8].

Одной из ранних математических моделей, которая учитывает внутригрупповое распределение реакционной способности углеводородов, является модель процесса риформинга бензиновой фракции в виде системы интегро-дифференциальных уравнений [9]:

$$\frac{dC_i(x, \tau)}{d\tau} = \sum_{m=1}^p k_m(x)C_i(x, \tau) + \sum_{m=1}^p k_m(x)C_i(x, \tau)C_{H_2} + \sum_{s=1}^n C_{H_2} \int_{x_i}^b k_m(x)C_s(x', \tau)v_m(x, x')\delta(x' - x_j)dx';$$

$$\frac{dT(\tau)}{d\tau} = -\frac{1}{C_p^{см}} \sum_{j=1}^n \Delta H_j \int_{x_j}^b k_j(x')C_j(x')\delta(x' - x_j)dx', \quad (1)$$

где $C_i(x, \tau)$, $k_m(x)$ — функции распределения концентраций углеводородов и констант скоростей реакций; $v_m(x, x')$ — функции распределения вероятностей разрыва связей при гидрокрекинге парафиновых углеводородов; τ — время пребывания реагентов в зоне реакции; $T(\tau)$ — изменение температуры в ходе процесса; $C_p^{см}$ — теплоемкость смеси; ΔH_j — средняя для данной группы энтальпия реакций; x — число атомов углерода в молекуле углеводорода; i — количество групп углеводородов (парафины, изопарафины, циклопентаны, циклогексаны, ароматические); m — количество групповых реакций, протекающих в процессе ($m = 1 - 14$); l — порядок реакций по водороду.

Математическая модель (1), программно реализованная на ЭВМ ЕС-1033, послужила основой для построения системы автоматического проектирования

(САПР) реакторного узла каталитического риформинга бензиновых фракций.

Другая модель каталитического риформинга с движущимся зернистым слоем катализатора представляет собой систему уравнений материального и теплового балансов [9]:

$$G \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} = -u \cdot \frac{\partial C_i}{\partial r} - \phi \cdot \frac{\partial C_i}{\partial l} + \frac{1}{l} \int_0^l W_j(l) a_j(l) dl;$$

$$\rho^{см} \cdot C_p^{см} \cdot G \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = -u \cdot \rho^{см} \cdot C_p^{см} \cdot G \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \phi \cdot \rho^{кат} \cdot C_p^{кат} \cdot \frac{\partial T}{\partial l} + \sum Q_j \cdot \frac{1}{l} \int_0^l W_j(l) a_j(l) dl.$$

Начальные условия: $z = 0$ $C_i = 0$, $T = 0$; при $l = 0$ $C_i = C_{i,0}$, $T = T_{вх}$ (на входе в реактор); при $r = 0$ $C_i = C_{i,0}$, $T = T_{вх}$, где z — объем переработанного сырья, m^3 ; G — расход сырья, $m^3/ч$; u — линейная скорость потока, $m/ч$; l — длина слоя катализатора в реакторе, m ; ϕ — скорость движения катализатора, $m/ч$; W_j — суммарная скорость протекания реакций, $моль/(m^3 \cdot ч)$; $\rho^{см}$, $\rho^{кат}$ — плотность смеси и катализатора, $кг/м^3$; $C_p^{см}$, $C_p^{кат}$ — теплоемкость смеси и катализатора, $Дж/(кг \cdot K)$; Q_j — тепловой эффект химической реакции, $Дж/моль$; T — температура, K .

Известны и другие модели первой группы, одна из которых, например, представляет собой совокупность пятидесяти трех дифференциальных уравнений, учитывающих превращения двадцати компонентов реакционной смеси [11]. Такая модель имеет существенный недостаток, связанный с учетом взаимного влияния реакций. Помимо этого, анализировать сырье в промышленных условиях с определением содержания двадцати компонентов неудобно, и от точности определения хотя бы одного из компонентов существенно зависит конечный результат. Такой анализ требует большого запаса времени, в течение которого качество сырья может измениться.

Кинетические модели первой группы достаточно полно отражают физико-химические закономерности процесса риформинга, и при отсутствии возмущений адекватны описываемому процессу в широком диапазоне изменения режимных параметров. Однако кинетические модели не учитывают в явном виде наблюдаемые возмущения (изменение состава сырья), получаются сложными, требуют большого объема информации, и их реализация в режиме управления оказывается трудной или невозможной. Поэтому в большинстве случаев такие модели для построения оптимальных систем управления оказываются неудобными.

Математические модели второй группы в этом смысле более удобны. Так, математическая модель, разработанная в [11], представлена в виде группы регрессионных уравнений, которые выражают зависимость выхода стабильного катализата от основных параметров процесса. Коэффициенты модели определяются экспериментально. В работе [13] математическая модель каталитического риформинга получена методами математической статистики на основе экспериментальных данных, накопленных при нормальном режиме работы агрегатов. Эти и другие рассмотренные эм

пирически модели процесса риформинга разрабатывались без учета существующих возмущений объекта. Исследования, проведенные в [14], показали эффективность применения вероятностных моделей по сравнению с традиционными подходами к решению задачи оптимизации качества целевого продукта риформинга. В [15] статистическими методами был проведен сравнительный анализ алгоритмов управления процессом риформинга при различных параметрах случайных возмущений. Основным возмущением, от которого зависит результат функционирования процесса, является случайное изменение каких-либо свойств сырья при протекании его от одного резервуара к другому. При этом возможно изменение качества целевого продукта. Поэтому для учета свойств сырья в разрабатываемой модели процесса производят переход от детерминированной модели к вероятностной.

Можно сделать вывод о том, что общей проблемой построения математической модели каталитического риформинга является отсутствие учета неизмеримых возмущающих воздействий и изменения внутрисистемных параметров объекта [16].

Постановка задачи. Стабильный катализат, получаемый на выходе стабилизационной колонны, является одним из последних продуктов, получаемых в общей цепи процесса каталитического риформинга. После процесса стабилизации продукт поступает на заключительные стадии приготовления бензина (парк полуфабрикатов, смешивание полуфабрикатов, товарный парк). Поэтому управление процессом стабилизации катализата является одной из наиболее важных задач на установке риформинга.

Так как установка каталитического риформинга предназначена для получения высокооктанового компонента бензиновой фракции, то для надежной работы установки, помимо управления процессом стабилизации катализата, необходимо обеспечить процесс риформинга катализаторами с высокой активностью. Но замена действующих катализаторов более стойкими к «жестким» режимам работы установки риформинга оказывается в большинстве случаев дорогостоящей процедурой для предприятия.

Экономически более выгодным решением поставленной задачи является построение интеллектуальной системы управления, которая бы учитывала накопленные знания высококвалифицированного оператора. Для разработки такой системы управления необходимо использовать методы теории нечеткой логики. Внедрение в систему управления процессом нечетких контроллеров не является дорогостоящей процедурой и имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с контроллерами, реализующими типовые законы регулирования [17].

Накопленные знания оператора направлены на обеспечение желаемого функционирования технологического процесса, протекающего в установке. Например, в блоке стабилизации катализата установки риформинга операторам необходимо следить за работой отпарной колонны для обеспечения полной отпарки влаги и сероводорода. Для стабилизационной колонны вводится требование, связанное с недопустимостью попадания легких углеводородов в стабильный катали-

зат, откачиваемый с низа колонны. Руководствуясь технологическим регламентом установки и накопленными знаниями оператора, можно получить некоторые правила работы при повышении (или понижении) контролируемого параметра. Например, после повышения расхода сырья установки риформинга следует повысить температуру на входе реакторов. Общий подход состоит в примерном следовании вышеуказанным правилам:

- повышение расхода сырья на 10 % — повышение температуры на 2,0 °С;
- повышение расхода сырья на 20 % — повышение температуры на 3,5 °С;
- повышение расхода сырья на 50 % — повышение температуры на 8,0 °С.

На основе знаний оператора необходимо сформировать нечеткую базу знаний, которая грубо отражает нелинейную взаимосвязь «входы – выход» с помощью лингвистических правил «Если – то». В качестве нечеткого логического вывода принимаем логический вывод Мамдани, выполняемый по такой базе знаний:

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j} \Theta_j \ x_2 = \tilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j \ x_n = \tilde{a}_{nj} \text{ с весом } w_j) \Rightarrow \\ \Rightarrow y = \tilde{d}_j, \ j = \overline{1, m},$$

в которой все значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами. Здесь \tilde{a}_{ij} — нечеткий терм, которым оценивается переменная x_i в j -м правиле, $j = \overline{1, m}$; d_j — заключение j -ого правила; m — количество правил в базе знаний; Θ_j — логическая операция, связывающая фрагменты антецедента j -ого правила (ей может быть логическая операция И или ИЛИ); \Rightarrow — нечеткая импликация.

Согласно методу наименьших квадратов, настройка нечеткой базы знаний Мамдани сводится к следующей задаче математического программирования: найти такой вектор (P, W) , чтобы:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(P, W, X_r))^2} \rightarrow \min,$$

где $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ — входной вектор в r -й паре обучающей выборки и y_r — соответствующий выход; P — вектор параметров функции принадлежности термов входных и выходной переменных; W — вектор весовых коэффициентов правил базы знаний; $F(P, W, X_r)$ — результат вывода по нечеткой базе знаний Мамдани с параметрами (P, W) при значении входов X_r [18].

Существует немало количество научных работ, посвященных проблеме синтеза систем управления технологическими процессами на базе нечеткой логики. В [19] была рассмотрена задача построения нечеткой системы управления охлаждающими впрысками энергоблока сверхкритического давления. Был описан и реализован алгоритм управления системой охлаждающих впрысков. В работе [20] рассматривается задача ограничения скорости следящего электропривода в пределах допустимых значений при различных управляющих воздействиях. Было предложено решение по

ставленной задачи в виде системы регулирования положения с нечетким регулятором. Результаты этих и других работ по настройке нечетких регуляторов и нечетких систем управления свидетельствовали о необходимости полной или частичной замены традиционных типовых методов регулирования (ПИ, ПИД) нечетким управлением, благодаря которому обеспечивается качественный переходный процесс с минимальной его длительностью.

Разработка системы управления с нечетким регулятором температуры. Примем число термов, с помощью которых оцениваются лингвистические переменные (входные и выходные параметры нечеткого регулятора), ошибка системы θ , скорость изменения (первая производная) ошибки $\dot{\theta}$, ускорение (вторая производная) $\ddot{\theta}$ ошибки, управляющее воздействие на объект m , равным трем.

Представим систему управления температурой низа колонны стабилизации с цифровым нечетким регулятором (НР) в виде следующей структурной схемы [21]:

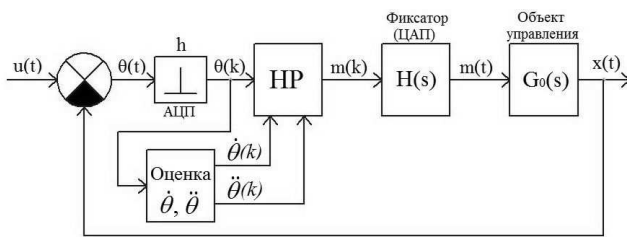


Рис. 3. Примерная структура системы управления с цифровым НР

В качестве управляющего воздействия $\theta(t)$ в нечеткой системе будет выступать ошибка регулирования температуры, измеряемой на выходе из трубчатой печи П-4 подогрева сырья колонны К-2. Температура на выходе печи подогрева П-4 должна поддерживаться в заданных пределах: $220 \div 256$ °С. После выработки управляющего воздействия НР получаем значение ошибки регулирования температуры $m(t)$ печи подогрева П-4, которое будет подано на исследуемую, в системе Matlab Simulink, модель стабилизационной колонны К-2. На выходе объекта управления мы получаем значение ошибки регулирования температуры $x(t)$ низа колонны К-2. На регулирование температуры низа стабилизационной колонны К-2 также накладываются ограничения: $200 \div 250$ °С.

Для нахождения граничных значений диапазонов изменения переменных $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ воспользуемся полученной в работе [22] временной зависимостью температуры продукта на выходе печи подогрева, которая идентична по своим характеристикам исследуемой печи П-4:

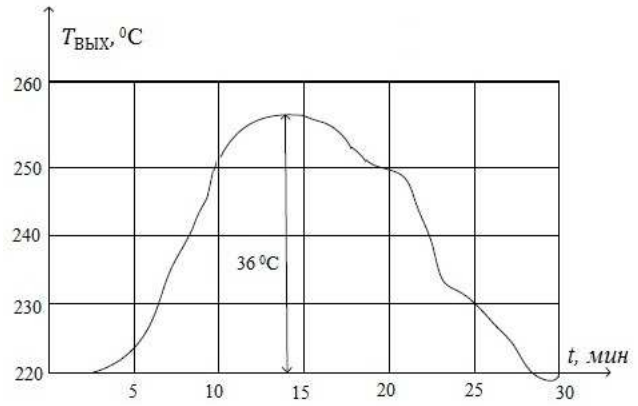


Рис. 4. Зависимость температуры продукта на выходе печи от времени работы установки

При обработке данной зависимости методом полиномиальной аппроксимации (со степенью полинома $n = 3$) получили уравнение:

$$T(t) = -0,0021 \cdot t^3 - 0,1397 \cdot t^2 + 6,0315 \cdot t + 201,82.$$

На рис. 3 задающим воздействием $u(t)$ будет служить температура, которая будет варьировать в установленных пределах значения ошибки: 21 °С. Если $T(t) = (220 \div 256)$ °С, то $u(t) = (199 \div 277)$ °С. Тогда получаем уравнение переменной «ошибки» следующим образом:

$$\theta(t) = u(t) - T(t) = 21 - 0,0021t^3 - 0,1397t^2 + 6,0315t. \quad (2)$$

Дифференцируя по t уравнение (2), найдем уравнения переменных $\dot{\theta}(t), \ddot{\theta}(t)$:

$$\dot{\theta}(t) = -0,0063t^2 - 0,2794t + 6,0315$$

$$\ddot{\theta}(t) = -0,0126t - 0,2794.$$

Для нахождения границ для переменной $\dot{\theta}(t)$ продифференцируем функцию $\dot{\theta}(t)$ и найдем наибольшее и наименьшее ее значения в пределах $[0 \div 30]$ мин:

$$\frac{d\dot{\theta}(t)}{dt} = \ddot{\theta}(t) = -0,0126 \cdot t - 0,2794 = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow t = -22,175(\text{мин}) \notin [0 \div 30](\text{мин})$$

При $t = 0$ (мин) $\dot{\theta}_{\max} = 6,0315$ (°С/мин); при $t = 30$ (мин) $\dot{\theta}_{\min} = -8,0205$ (°С/мин).

Найдем границы для переменной $\ddot{\theta}(t)$.

При $t = 0$ (мин) $\ddot{\theta}_{\max} = -0,2794$ (°С/мин²); при $t = 30$ (мин) $\ddot{\theta}_{\min} = -0,6574$ (°С/мин²).

Найдем границы для переменной $\theta(t)$.

При $t = 15,92$ (мин) $\theta_{\max} = 73,14$ (°С); при $t = 30$ (мин) $\theta_{\min} = 19,51$ (°С).

Была произведена фазификация входных и выходной лингвистических переменных: ошибка системы θ , скорость изменения (первая производная) ошибки $\dot{\theta}$,

ускорение (вторая производная) ошибки $\ddot{\theta}$, управляющее воздействие на объект m в соответствии с рекомендациями, описанными в [23]. Здесь на основе сравнительного анализа переходных процессов была выбрана система нечеткого вывода Мамдани. Так же на основе анализа технологических регламентов установки риформинга была получена нечеткая база правил (табл. 2).

Рабочее правило управления нечеткого регулятора может быть сформировано в виде:

$$\text{Если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_c^j), j = \overline{1,3},$$

где a_1^j, a_2^j и a_3^j — лингвистические оценки ошибки, скорости (первой производной) ошибки и второй производной ошибки, рассматриваемые как нечеткие множества, определенные на универсальном множестве, $j = \overline{1,3}$; a_c^j — лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из терм-множества переменной m . Лингвистические оценки выбираются из терм-множества лингвистических переменных θ^* , $\dot{\theta}^*$, $\ddot{\theta}^*$ и m^* :

$$a_j^j \in \{\text{отрицательная}(1), \text{положительная}(2), \text{нулевая}(3)\}$$

Другими словами, все сигналы (определенные выше лингвистические переменные) в системе автоматического управления характеризуются как отрицательные ($j = 1$), положительные ($j = 2$) и нулевые ($j = 3$).

Таблица 2

Фрагмент нечеткой базы правил

θ	$\dot{\theta}$		
	N	Z	P
N	Z	NM	NL
Z	PM	Z	NM
P	PL	PM	Z

Производим отображение диапазонов $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$ и $[m_{\min}, m_{\max}]$ изменения входных и выходного параметров на единое универсальное множество [24]:

$$u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}) = (\theta^* - 19,51) / 53,63$$

$$u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}) = (\dot{\theta}^* + 8,02) / 14,05$$

$$u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}) = (\ddot{\theta}^* + 0,66) / 0,38$$

$$u_c^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}) = (m^* - 17,45) / 33,65$$

Передаточная функция объекта управления (стабилизационной колонны К-2) будет следующей [25]:

$$G_K(s) = \frac{3 \cdot e^{-30 \cdot s}}{72856,17 \cdot s^3 + 6092,43 \cdot s^2 + 133,82 \cdot s + 1}$$

Будем считать, что параметры конструкции аппарата и работы катализатора не изменяются в некотором промежутке времени, т. е. передаточная функция объекта содержит постоянные коэффициенты.

Составленные в интерактивной системе MATLAB структурные схемы систем регулирования температуры низа колонны К-2 установки риформинга с цифровыми ПИД-регулятором и нечетким регулятором приведены на рис. 5.

Передаточная функция цифрового ПИД-регулятора будет следующей:

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{h_0} \frac{z-1}{z} \quad (3)$$

Настройка регуляторов произведена с целью получения минимальной динамической ошибки рассогласования. После настройки цифрового ПИД-регулятора при шаге дискретизации $h_0 = 0.001$ с получены следующие оптимальные коэффициенты передаточной функции (3):

$$K = 0,672; K_i = 0,0018; K_d = 63.$$

Структурная схема нечеткого регулятора состоит из аналого-цифрового преобразователя АЦП (фиксатор *Zero-Order Hold*, работает с шагом квантования h_0), блоков оценки первой и второй производной ошибки системы, блоков нормировки входных (*normin*) и выходного (*normout*) сигналов, центрального блока нечеткого регулятора *Fuzzy Logic Controller* и выходного цифроаналогового преобразователя (фиксатор *Zero-Order Hold 1*, работает с шагом квантования h_0) [26].

Для упрощения нормировки (пересчета значений сигналов в значения элементов единого универсального множества) диапазоны изменения входных и выходного сигналов (параметры нечеткого регулятора) принимаем симметричными:

$$A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min} = 26,81(^{\circ}\text{C});$$

$$B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min} = 7,025(^{\circ}\text{C}/\text{мин});$$

$$C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min} = 0,19(^{\circ}\text{C}/\text{мин}^2);$$

$$D_m = m_{\max} = -m_{\min} = 16,825(^{\circ}\text{C}).$$

С учетом последних изменений построены структурные схемы блоков нормировки входных (*normin*) и выходного (*normout*) сигналов (рис. 6).

Получены переходные процессы в системах управления с цифровыми ПИД-регулятором и нечетким регулятором (рис. 7). На основании данных процессов было произведено сравнение показателей качества регулирования в системах управления (табл. 3).

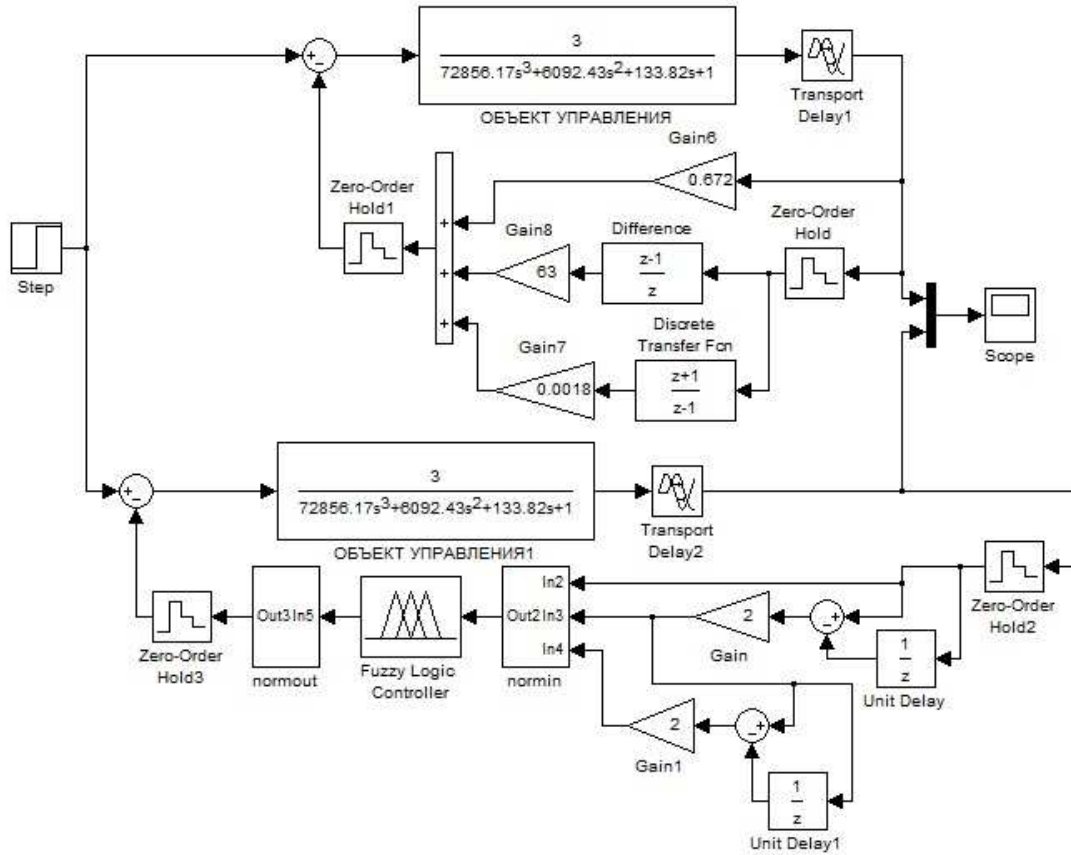


Рис. 5. Структурные схемы систем регулирования с цифровыми ПИД- и нечетким регуляторами

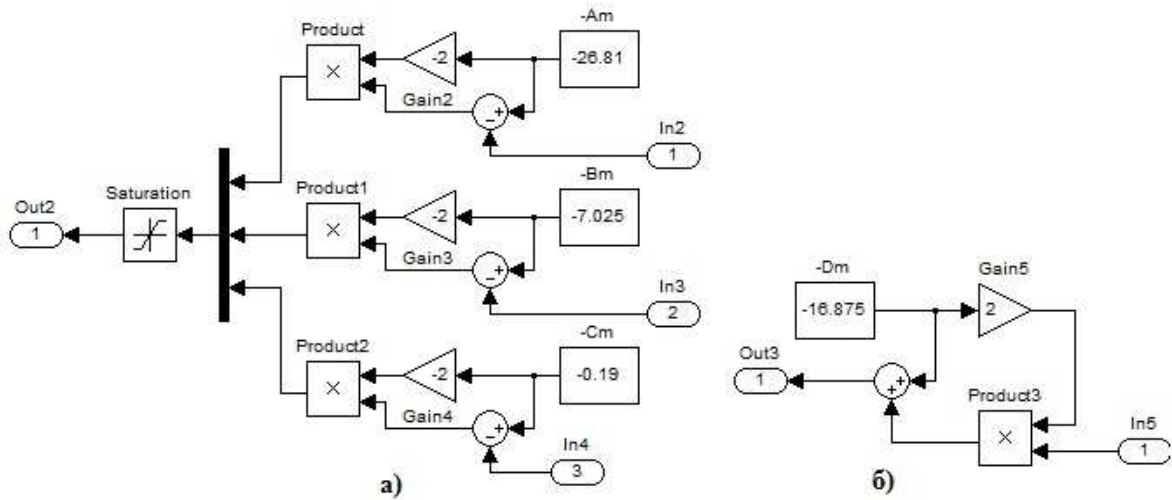


Рис. 6. Структурные схемы блоков нормировки: а — входных сигналов; б — выходного сигнала

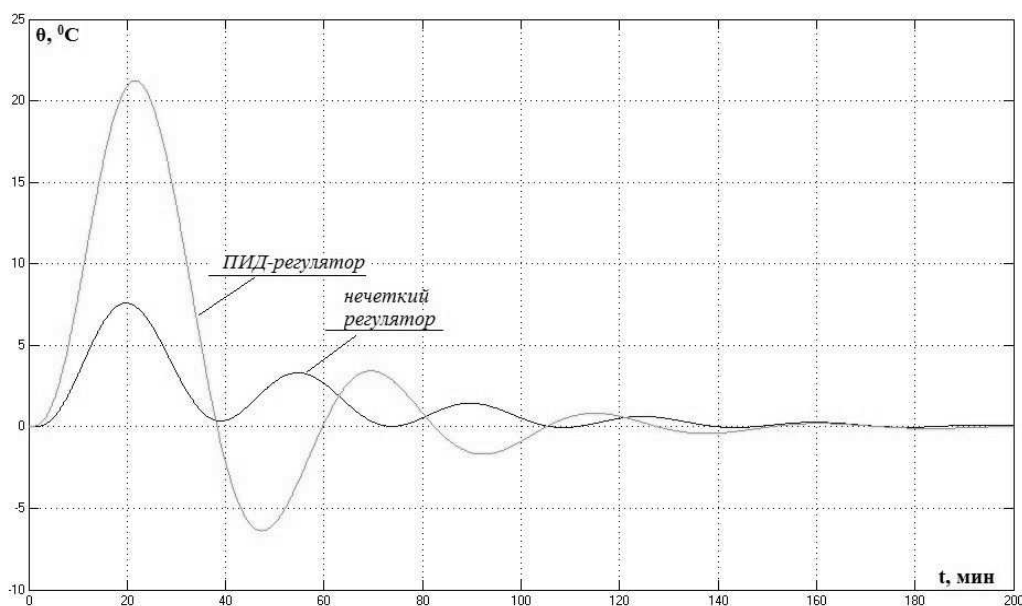


Рис. 7. Переходные процессы в системах с цифровыми ПИД- и нечетким регуляторами

Таблица 3

Показатели качества процессов в системах управления

Показатель	Система с ПИД-регулятором	Система с нечетким регулятором
Время переходного процесса t_p , [мин]	200	180
Перерегулирование σ , [°C]	21,29	7,59
Время достижения первого максимума t_{MAX} , [мин]	21,875	19,89
Степень затухания ψ	$(21,29-3,33)/21,29 = 0,8436$	$(7,59-3,32)/7,59 = 0,5626$
Квадратичный интегральный критерий качества I_2	7418	975,5

Заключение

Анализируя полученные переходные процессы, можно заключить, что как ПИД-регулятор, так и нечеткий регулятор в системе регулирования температуры куба стабилизационной колонны риформинга обеспечивают устойчивое поддержание теплового режима колонны с достаточно высокими показателями качества. Но в системе с нечетким (работающим на базе нечеткой логики) регулятором величина перерегулирования в три раза меньше, чем в системе с ПИД-регулятором. Рассмотренный нечеткий регулятор придает всей системе автоматического регулирования способность поддерживать на заданном уровне как температуру, так и динамику изменения ее во времени, т. е. регулировать качество процесса каталитического риформинга. Так как параметры стабилизационной колонны установки риформинга изменяются в очень широких диапазонах, то нечеткий регулятор может обеспечивать достаточное качество системы управления.

Литература

- Петров П.А. Моделирование процесса каталитического риформинга // *Фундаментальные исследования*. 2007. № 12-2. С. 308-309.
- Шура И.А., Сотников В.В., Сибаров Д.А. Математическая модель для управления процессом каталитического ри-

форминга // *Информационные системы и технологии*. 2008. № 1-3. С. 307-311.

3. Щербатов И.А., Проталинский О.М. Система поддержки принятия решений для операторов слабоформализуемых ТП // *Автоматизация в промышленности*. 2009. № 7. С. 41.

4. Проталинский О.М., Мичуров Ю.И., Щербатов И.А. Гибридная модель каталитического реактора процесса Клауса // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки*. 2005. Прил. № 2. С. 23-34.

5. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. СПб.: БХВ, 2005. 736 с.

6. Технологический регламент установки каталитического риформинга У-1.734 3418-ТР У-1.734 ГПЗ ООО «Газпром добыча Астрахань», 2007.

7. Схиртладзе А.Г., Федотов А.В., Хомченко В.Г. Автоматизация технологических процессов и производств. М.: Абрис, 2012. 565 с.

8. Истомин А.Л., Кривов М.В. Построение математической модели установки каталитического риформинга в нефтеперерабатывающем производстве // *Сб. науч. тр. Ангарской гос. техн. акад.* 2005. Т. 1, № 1. С. 110-117.

9. Кравцов А.В., Москвин В.С., Бесков В.С., Плешакова О.Е., Ушева Н.В. Моделирование процесса каталитического риформинга бензинов: тем. обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. 69 с.

10. Gyngazova M.S., Kravtsov A.V., Ivanchins E.D., Korolenko M.V., Chekantsev N.V. Reactor modeling and simulation of moving-bed catalytic reforming process // *Chemical Engineering Journal*. 2011. Vol.176. P.134-143.

11. Крейн Дж. Модель процесса каталитического риформинга. Труды IV Международного нефтяного конгресса / Дж. Крейн. М.: Гостоптехиздат, 1961. 34 с.

12. Бельцов Б.А. О математическом описании процесса платформинга // *Химия и технология топлив и масел*. 1966. № 8. С. 11-12.

13. Жоров Ю.М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии. М.: Химия, 1978. 213 с.

14. Зейналов М.Ф. Управление установкой двухступенчатого каталитического крекинга в условиях неопределенности: дис. ...канд. техн. наук. Баку, 1986. 100 с.

15. Симарзин В.В., Борзенко Н.М., Рабинович Б.А., Серебрянский А.Я. Субоптимальные алгоритмы управления процессом каталитического крекинга // *Труды ЦНИИКА*, 1983. Вып. 55. С. 21-23.

16. Проталинский О.М., Савельев А.Н., Щербатов И.А. Оптимальное управление технологическим процессом Клауса

в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2006. № Спец. вып. С. 19а-25.

17. Щербатов И.А. Снижение объемов промышленных выбросов крупнотоннажных установок с использованием экспертной информации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 1. С. 121-125.

18. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. 288 с.

19. Красников А.Л. Нечеткая система управления охлаждающими впрысками энергоблока СКД 300 МВт. // Материалы Международной научной конференции. Киев: КПИ, 2012. С. 219-225.

20. Ланграф С.В., Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечетким регулятором // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 4. С. 168-173.

21. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев.: Радиоаматор, 2008. 972 с.

22. Положаенко С.А., Григоренко Ю.В. Система управления трубчатой печью установки каталитического риформинга высокооктановых бензинов // Электромашиностроение и электрооборудование. 2010. № 75. С. 62-67.

23. Джембеков А.М. Сравнительный анализ качества переходных процессов в традиционной и соответствующей ей нечеткой экспертной системе регулирования температуры куба стабилизационной колонны установки каталитического риформинга // Интеграция мировых научных процессов как основа общественного процесса: материалы Международных конкурсов Общества, Науки и Творчества (г. Казань) за декабрь 2013 г. Казань, 2013. С. 87-95.

24. Проталинский О.М., Щербатов И.А., Беляев И.О. Гибридный метод обучения нейронных сетей для классификации каталитической стадии процесса Клауса // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. Т. 4, № 2. С. 38-43.

25. Джембеков А.М. Синтез системы fuzzy-регулирования температуры куба стабилизационной колонны установки каталитического риформинга // Информатика и информационные технологии в образовании, науке и производстве: сб. науч. ст. Нобель Пресс. 2014. Ч. 1. С. 20-26.

26. Гостев В.И. Проектирование трехрежимного нечеткого регулятора для систем активного управления очередью в ТСП/IP сетях // Радиоэлектроника, информатика, управления. 2012. № 1. С. 19-27.

References

1. Petrov P.A. Modeling process rolled-matic reforming // Fundamental'nye issledovaniya. 2007. № 12-2. P. 308-309.

2. Shura I.A., Sotnikov V.V., Sibarov D.A. Mathematical model for councilment process of catalytic reforming // Informatsionnye sistemy i tekhnologii. 2008. № 1-3. P. 307-311.

3. Shcherbatov I.A., Protalinskii O.M. Decision support system for operators of poorly formalized TA // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2009. № 7. P. 41.

4. Protalinskii O.M., Michurov Yu.I., Shcherbatov I.A. The hybrid model rolled-cal reactor of the Claus // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhn. nauki. 2005. Pril. № 2. P. 23-34.

5. Leonenkov A. Yu. Fuzzy modeling in Matlab and fuzzy-Tech. SPb.: BKhV, 2005. 736 p.

6. Technological rules catalytic reforming unit U-1.734 3418-TR U-1.734 GPZ OOO «Gazprom dobycha Astrakhan», 2007.

7. Skhirtladze A.G., Fedotov A.V., Homchenko V.G. Automation of technological-chemical processes and production: uchebnyk. M.: Abris, 2012. 565 p.

8. Istomin A.L., Krivov M.V. Construct a mathematical model of the catalytic reforming in the refinery production // Sb. nauch. tr. Angarskoi gos. tekhn. akad. 2005. T. 1, № 1. P. 110-117.

9. Kravtsov A.V., Moskvina V.S., Beskov V.S., Pleshakova O.E., Usheva N.V. Modeling of the process of catalytic reforming of gasoline: tem. obzor. M.: TsNIITeneftkhim, 1990. 69 p.

10. Gyngazova M.S. Kravtsov A.V., Ivanchins E.D., Korolenko M.V., Chekantsev N.V. Reactor modeling and simulation of moving-bed catalytic reforming process // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol.176. P. 134-143.

11. Krein Dzh. Model catalytic reforming process // Trudy IV Mezhdunarodnogo neftyanogo kongressa. M.: Gostoptekhizdat, 1961. 34 p.

12. Bel'tsov B.A. The mathematical description of the process platforming // Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. 1966. № 8. P. 11-12.

13. Zhorov Yu.M. Modeling of physical and chemical processes of refining and petrochemical. M.: Khimiya, 1978. 213 p.

14. Zeinalov M.F. Operation of the unit two-stage catalytic cracking under conditions of uncertainty: dis. ...kand. tekhn. nauk. Baku, 1986. 100 p.

15. Simarzin V.V., Borzenko N.M., Rabinovich B.A., Serebryanskii A.Ya. Suboptimal control algorithms process of catalytic cracking // Trudy TsNIKA, 1983. Vyp.55. P. 21-23.

16. Protalinskii O.M., Savel'ev A.N., Shcherbatov I.A. Optimal process control under uncertainty Claus // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2006. № Spets. vyp. P. 19а-25.

17. Shcherbatov I.A. The decline in industrial emissions of large facilities using expert information // Vestnik Astrakhanского государственного технического университета. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2009. № 1. P. 121-125.

18. Shtovba S.D. Design of fuzzy systems by means of Matlab. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2007. 288 p.

19. Krasnikov A.L. Fuzzy control system cooling injection unit SKD 300 MW // Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Kiev: KPI, 2012. P. 219-225.

20. Langraf S.V., Sapozhnikov A.I., Glazyrin A.S., Kozlova L.E., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Afanas'ev K.S. The dynamics of the electric drive with fuzzy controller // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2010. T. 316, № 4. P. 168-173.

21. Gostev V.I. Fuzzy controllers in automatic control systems. Kiev.: Radioamator, 2008. 972 p.

22. Polozhaenko S.A., Grigorenko Yu.V. Management System tube furnace of the catalytic reforming of high octane gasoline // Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie. 2010. № 75. P. 62-67.

23. Dzhabbekov A.M. Comparative analysis of transients in the traditional and the corresponding fuzzy expert system controlling the temperature of the cube column stabilization of the catalytic reforming // Integratsiya mirovykh nauchnykh protsessov kak osnova obshchestvennogo protsessa: materialy Mezhdunarodnykh konkursov Obshchestva, Nauki i Tvorchestva (g. Kazan') za dekabr' 2013 g. Kazan', 2013. P. 87-95.

24. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Belyaev I.O. The hybrid learning method of neural networks for classification katalitiche XYZ stage of the Claus // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. T. 4, № 2. P. 38-43.

25. Dzhabbekov A.M. Synthesis of fuzzy-control the temperature of the cube column stabilization of the catalytic reforming // Informatika i informatsionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sb. nauch. st. Nobel' Press. 2014. Ch. 1. P. 20-26.

26. Gostev V.I. Tri-mode design of fuzzy controller for active queue management systems in TCP / IP networks // Radioelektronika, informatika, upravlinnya. 2012. № 1. P. 19-27.

