

## РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

В. В. Вычужанин, д-р техн. наук, проф.

*Одесский национальный морской университет, г. Одесса*

**Аннотация.** Приведены результаты разработки и исследования фаззи-регулятора с нечеткой динамической коррекцией для управления нелинейными объектами с переменными параметрами.

**Ключевые слова:** регулятор, фаззи-логика, фаззификация, дефаззификация, нечеткая динамическая коррекция.

**Анотация.** Наведені результати розробки і дослідження фаззи-регулятора з нечіткою динамічною корекцією для керування нелінійними об'єктами зі змінними параметрами.

**Ключові слова:** регулятор, фаззи-логіка, фаззифікація, дефаззифікація, нечітка динамічна корекція.

**Abstract.** This article presents the results of research and development of fuzzy controller with fuzzy dynamic correction for the control of nonlinear objects with variable parameters.

**Keywords:** controller, fuzzy logic, fuzzification, defuzzification, fuzzy dynamic correction.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик агрегатов и систем кондиционирования воздуха (СКВ) показали существенную нелинейность дифференциальных уравнений, описывающих динамику подобных систем, а также наличие неопределенностей в их статических и динамических математических моделях [1]. Было установлено, что передаточные функции агрегатов в эксплуатационных условиях при нестационарных тепловых и влажностных нагрузках на СКВ характеризуются переменными значениями коэффициентов настроек, существенно отличающихся от расчетных значений. Таким образом, в зависимости от характера из-

менения регулируемого параметра разрабатываемые регуляторы при наличии неопределенностей математических моделей СКВ должны иметь переменные коэффициенты настроек. Решение данной проблемы позволит уменьшить перерегулирование управляемых параметров СКВ, снизить время их установления и повысить робастность регулятора в условиях наличия неполной информации об объекте управления.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованиями [1] установлено, что применение классических, например пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД), регуляторов

не всегда позволяет получить оптимальные динамические характеристики управляемых нелинейных объектов, к которым относятся СКВ. Из теории автоматического регулирования также известно, что при недостаточной информации об объекте управления ПИД-регуляторы имеют неудовлетворительные показатели качества при управлении [5].

Одно из проектных решений, позволяющее в условиях наличия неполной информации об объекте управления уменьшить перерегулирование управляемых параметров СКВ, снизить время их установления и повысить робастность разрабатываемых регуляторов, заключается в применении методов нечеткой (фаззи) логики. Нечеткое управление (управление на основе методов теории нечетких множеств) используется в нелинейных управляемых системах при отсутствии полной информации об объекте управления. Функционирование подобных регуляторов в отличие от работы классических регуляторов основывается на применении лингвистических переменных аппарата теории нечетких множеств [6].

В мировой практике существует большое разнообразие фаззи-контроллеров. В последние годы интенсивно ведутся работы по реализации фаззи ПД-, ПИ- и ПИД-контроллеров. Качество работы большинства из них оценивается по реакции системы регулирования на изменение заданного значения регулируемого параметра. Однако о качестве работы подобных контроллеров следует судить по их способности обрабатывать возмущающие воздействия на управляемый объект [3, 6, 8, 9]. Кроме того, реализация фаззи ПИД-регулятора вызывает проблемы, поскольку он должен иметь трехмерную таблицу правил в соответствии с тремя слагаемыми в уравнении регулятора, которую чрезвычайно сложно заполнить, пользуясь ответами экс-

перта. Окончательная настройка такого регулятора или близкая к оптимальной настройке до сих пор остается трудной задачей. Количество правил, учитывающих все возможные комбинации фаззи ПИД-регулятора, равно  $n_1 \times n_2 \times n_3$ , где  $n_1, n_2, n_3$  — число лингвистических термов трех входных переменных. Для  $n_1 = n_2 = n_3 = 7$  количество правил равно 343. При практическом применении разработка и внедрение такой большой базы правил требует существенных вычислительных ресурсов и времени. Типичный подход к уменьшению числа правил — разделить ПИД-регулятор на две отдельные части, например ПД- и И-части. Посредством комбинации ПД-алгоритма стратегии фаззи-управления, И-алгоритма классического управления можно реализовать комбинированный ПИД-регулятор с помощью двух входных переменных, что значительно снижает количество управляющих правил без ухудшения качества регулирования [2].

Одним из перспективных применений регуляторов с нечеткой логикой с переменными значениями коэффициентов настроек является оснащение ими управляемых нелинейных объектов. Причем следует использовать фаззи-логику для построения как самого регулятора, так и для организации нечеткой динамической коррекции его коэффициентов. Нечеткая динамическая коррекция фаззи-регуляторов позволяет уменьшить перерегулирование, снизить время установления и повысить робастность регулятора [6].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — разработка и реализация системы робастного управления СКВ на основе комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией, обеспечивающей минимальное перерегулирование и время установления при эксплуатационных параметрах, отличающихся от расчетных.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При создании для СКВ комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей применим способ, предусматривающий использование нечеткой динамической коррекции коэффициентов регулятора. На рис. 1 приведена разработанная структурная схема комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией.

Комбинированный ПИД-регулятор с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией системы управления объектом имеет: входные переменные — ошибка регулирования выходной координаты ( $e$ ) объекта и ее производная ( $de/dt$ ); выходную переменную — управляющее воздействие ( $u$ ).

В блоке фаззификации ПД (см. рис. 1) две составляющие сигнала ошибки после блока автонастройки преобразуются в нечеткие переменные. Эти переменные используются в блоке нечеткого логического вывода для формирования управляющего воздействия  $u_1$ . Управляющие воздействия  $u_1$  после операции дефаззификации и  $u_2$  после операции интегрирования поступают на сумматор и далее на объект управления. Основные функ-

ции при использовании нечеткой логики в разработанном регуляторе — это построение ПД-составляющей регулятора и формирование корректирующих поправок к коэффициентам настроек регулятора ( $k_p, k_i, k_d$ ) в зависимости от текущего значения параметра регулирования.

Процесс автонастройки комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией начинается с поиска начальных приближений коэффициентов  $k_p, k_i, k_d$ . Обычно подобная задача решается использованием метода Зиглера-Никольса исходя из периода колебаний численных значений коэффициентов  $k_p, k_i, k_d$ , после чего формируется критериальная функция, необходимая для поиска оптимальных значений параметров настройки [8].

В процессе нечеткой динамической коррекции комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей были выбраны диапазоны входных и выходных сигналов блока автонастройки, форма функций принадлежности искомым параметрам, правила нечеткого вывода, механизм логического вывода, метод дефаззификации. Поиск параметров фаззи ПД-составляющей

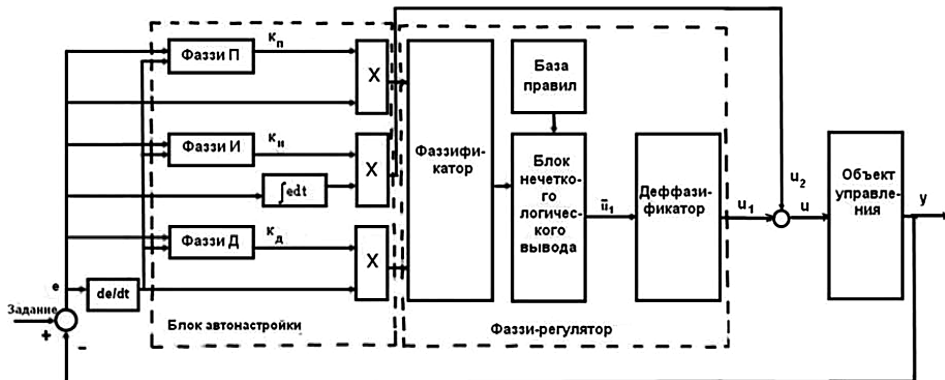
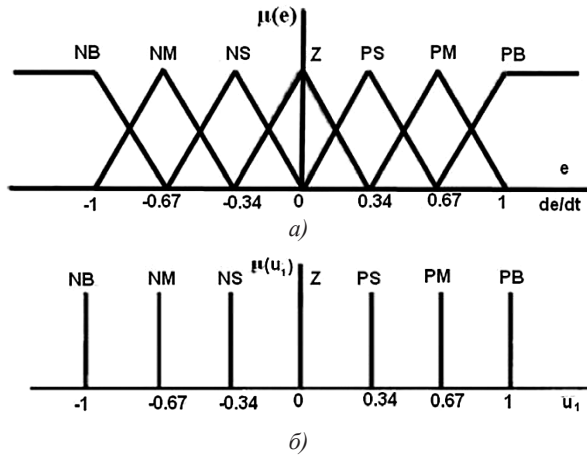
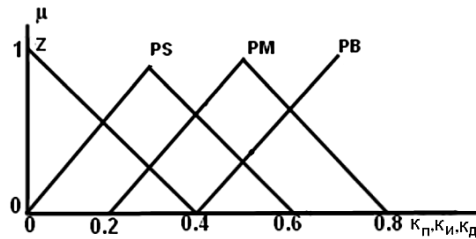


Рис. 1. Структурная схема ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией



**Рис. 2.** Функции принадлежности фаззи ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора с нечеткой динамической коррекцией входных (а) и выходной (б) переменных



**Рис. 3.** Функции принадлежности коэффициентов настроек блока автонастройки

регулятора осуществлен при решении оптимизационной задачи. Целевая функция при решении оптимизационной задачи представляет собой интеграл от суммы квадрата ошибки регулирования и времени установления выходной переменной объекта управления с наложением ограничений на диапазоны изменений позиций функций принадлежности. В качестве искомого параметров выбрано положение максимумов функций принадлежности.

Процессы фаззификации входных переменных для блока автонастройки и выходной переменной для фаззи ПД-составляющей регулятора иллюстрируются функциями принадлежности, приведенными соответственно на рис. 2 и 3. Функции принадлежности термов выходной переменной имеют дискрет-

ный характер и представляют собой совокупность одноэлементных нечетких множеств (см. рис. 2, а). В отличие от традиционной модели нечеткого вывода переменной Мамдани, специфическими особенностями которой являются использование правил, левая и правая часть которых содержит нечеткие множества (процесс вывода включает операции фаззификации, применения нечетких правил, агрегации и дефаззификации), применение разновидности модели Мамдани модели нечеткого вывода Truth Value Flow Inference позволяет существенно упростить операции выполнения нечетких правил, агрегации и дефаззификации использованием в правой части правил одноэлементных множеств (singleton). Таким образом, регулятор вырабатывает семь

лингвистических мер воздействия на исполнительный механизм устройства управления объектом.

На рис 2,а,б учтено, что каждой входной и выходной переменной соответствует семь лингвистических термов: *PB* — положительно большой; *PM* — положительно средний; *PS* — положительно малый; *Z* — нулевой; *NS* — отрицательно малый; *NM* — отрицательно средний; *NB* — отрицательно большой.

Функции принадлежности на рис. 2, а имеют треугольную, S- и Z-образную формы. Такие формы функций принадлежности просты, что позволяет уменьшить затраты времени при расчетах.

На рис. 3 приведены функции принадлежности коэффициентов настроек

блока автонастройки комбинированного ПИД-регулятора с нечеткой динамической коррекцией.

Для выполнения функции регулирования над переменными параметрами в фазе ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора сформулированы нечеткие правила, приведенные в табл. 1. Используя их, получены значения управляющей переменной  $u_1$  на выходе фазы ПД-составляющей регулятора.

В зависимости от текущего значения параметра регулирования при формировании корректирующих поправок к коэффициентам настроек комбинированного ПИД-регулятора для блока автонастройки ( $k_p, k_i, k_d$ ) были также сформулированы соответствующие нечеткие правила, представленные в табл. 2–4.

**Таблица 1.** Нечеткие правила фазы ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора

<i>e</i> \ <i>de</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PS</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>Z</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>

**Таблица 2.** Нечеткие правила для коэффициента настройки  $k_p$

<i>e</i> \ <i>de</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>
<i>NM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>
<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>

**Таблица 3.** Нечеткие правила для коэффициента настройки  $k_i$

<i>e</i> \ <i>de</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NM</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>

**Таблиця 4.** Нечеткие правила для коэффициента настройки  $k_d$

$e \backslash de$	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>
<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>
<i>PB</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>

Управляющее воздействие  $u_1$  на выходе фаззи ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора вычисляется по алгоритму Мамдани [7] при нечетком моделировании в среде Matlab [4]. В результате функция принадлежности для пересечения и объединения множества ошибки регулирования выходной координаты объекта ( $e$ ) и мно-

жества ее производной ( $de/dt$ ) находится как

$$\begin{aligned} \mu_{e \cap de/dt} &= \min(\mu_e, \mu_{de/dt}) \\ \mu_{e \cup de/dt} &= \max(\mu_e, \mu_{de/dt}). \end{aligned} \quad (1)$$

Функции принадлежности для каждого из множеств *PB*, *PM*, *PS*, *Z*, *NS*, *NM* и *NB*, входящих в нечеткую переменную  $\tilde{u}_1$ , получены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu_{\Pi 1}(\tilde{u}_1) &= \min\{\mu_{u1}(\tilde{u}_1), \min(\mu_{e1}(e), \mu_{de/dt1}(de/dt))\} \\ \mu_{\Pi 2}(\tilde{u}_1) &= \min\{\mu_{u2}(\tilde{u}_1), \min(\mu_{e2}(e), \mu_{de/dt2}(de/dt))\} \\ &\dots\dots\dots \\ \mu_{\Pi 49}(\tilde{u}_1) &= \min\{\mu_{u49}(\tilde{u}_1), \min(\mu_{e49}(e), \mu_{de/dt49}(de/dt))\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mu_{u1}(\tilde{u}_1) \dots \mu_{u49}(\tilde{u}_1)$  — функции принадлежности выходной переменной фаззи ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора;  $\mu_{e1}(e) \dots \mu_{e49}(e)$  — функции принадлежности входной переменной — ошибки регулирования выходной координаты объекта;  $\mu_{de/dt1}(de/dt) \dots \mu_{de/dt49}(de/dt)$  — функции принадлежности входной переменной — производной ошибки регулирования выходной координаты объекта.

Каждое из уравнений (2) соответствует одному из правил табл. 1. При аккумуляции результирующая функция принадлежности управляющего воздействия  $\tilde{u}_1$  находится в соответствии с (1) объединением функций принадлежности с учетом всех нечетких правил (см. табл. 1):

$$\begin{aligned} \mu(\tilde{u}_1) &= \max\{\mu_{\Pi 1}(\tilde{u}_1), \mu_{\Pi 2}(\tilde{u}_1), \dots \\ &\dots, \mu_{\Pi 49}(\tilde{u}_1)\}. \end{aligned}$$

Последующая дефаззификация проведена с использованием метода центра

тяжести для результирующей функции принадлежности

$$u_1 = \frac{\int \tilde{u}_1 \times \mu(\tilde{u}_1) d(\tilde{u}_1)}{\int \mu(\tilde{u}_1) d(\tilde{u}_1)}.$$

В соответствии с методом центра тяжести управляющее воздействие  $u_1$  вычисляется как абсцисса центра тяжести площади фигуры, образованной функцией принадлежности  $\mu(\tilde{u}_1)$  и осью  $\tilde{u}_1$ .

Выходы фаззи-блоков блока автонастройки (см. рис. 1) вычисляются по алгоритму Мамдани с учетом нечетких правил (см. табл. 2–4).

В соответствии со структурной схемой комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией, используемым алгоритмом вычислений коэффициентов настроек регулятора и управляющего воздействия структурирована принципиальная электрическая схема разработанного регулятора в программируемой логической интегральной

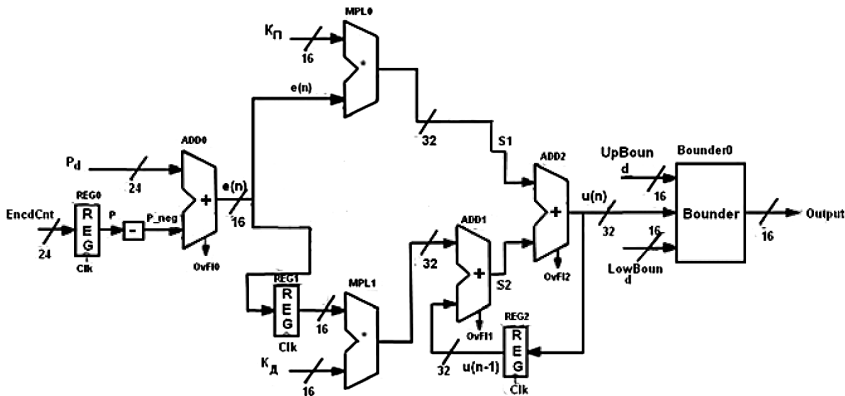


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема фаззи ПД-составляющей комбинированного ПИД-регулятора с нечеткой динамической коррекцией в ПЛИС: 16, 24, 32 — число разрядов в линии

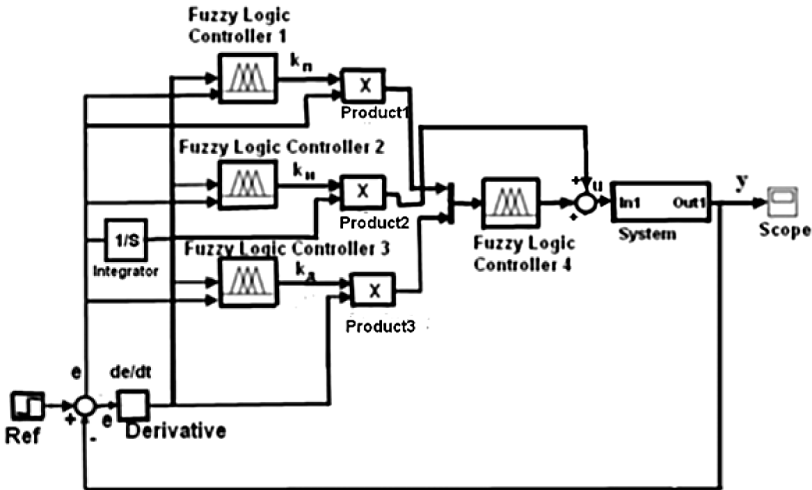
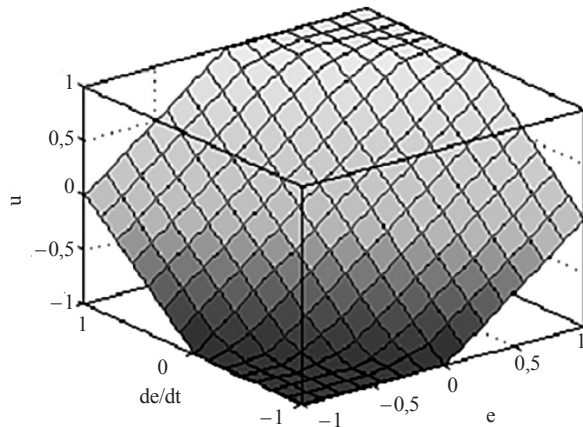


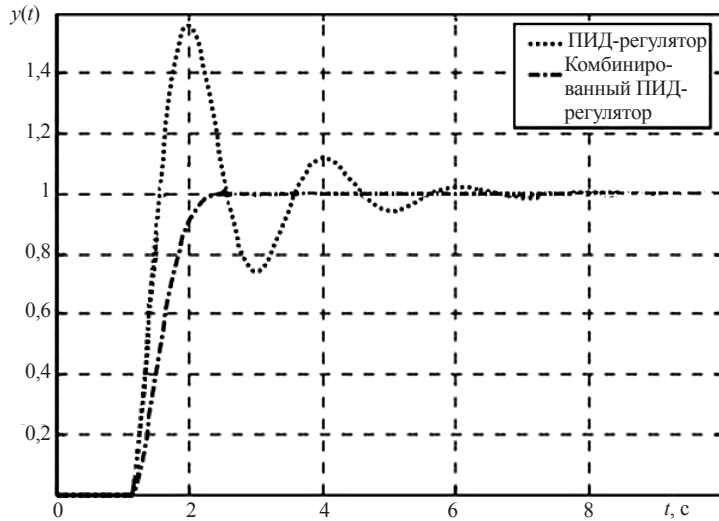
Рис. 5. Структурная схема модели комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией в MATLAB

схеме (ПЛИС). Для получения оптимальных параметров проектируемого регулятора на базе программируемой логики использовалась САПР Quartus II ver.9.1, позволяющая реализовать проект на ПЛИС фирмы Altera. Эта система имеет полный цикл и поддерживает сквозной процесс от ввода и контроля до программирования микросхем. На рис. 4 приведена фаззи ПД-составляющая комбинированного ПИД-регулятора с нечеткой динамической коррекцией в ПЛИС фирмы Altera.

Параметры настройки схемы комбинированного ПИД-регулятора с нечеткой динамической коррекцией уточнялись по результатам исследований в среде MATLAB с использованием пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox [4]. Исследуемая модель комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией приведена на рис. 5. На рис. 6 представлена полученная моделированием поверхность отклика выходной переменной разработанного



**Рис. 6.** Поверхность отклика выходной переменной комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией в MATLAB



**Рис. 7.** Кривые изменения выходной переменной объекта управления при использовании классического и комбинированного ПИД-регуляторов с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией.

регулятора ( $u$ ) с учетом изменений его входных координат  $e$  и  $de/dt$ .

На рис. 7 приведены результаты исследований в среде MATLAB классического ПИД-регулятора с постоянными параметрами и комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией.

Регуляторы исследовались в контуре управления воздухоохладителем СКВ при наличии возмущающих воздействий

ступенчатого характера (для нулевых начальных условий). Воздухоохладитель как объект управления представляет собой апериодическое звено первого порядка. Диапазоны изменений коэффициентов  $k_n$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  находятся в пределах  $k_n = -80 \dots -40$ ;  $k_i = 0,02 \dots 0,08$ ;  $k_d = 0,02 \dots 0,05$ . При проведении исследований параметры классического ПИД:  $k = 2$ ;  $T_n = 0,25$  с;  $T_d = 0,025$  с. Параметры комбинированного ПИД-регулятора



с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией:  $k_n = -40$ ;  $k_i = 0,08$ ;  $k_d = 0,05$ .

Как следует из полученных результатов исследований, в условиях кратковременных ступенчатых воздействий комбинированный ПИД-регулятор с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией обладает в 1,5 раза меньшей величиной перерегулирования, в 3 раза меньшим временем установления управляемого параметра в сравнении с классическим ПИД-регулятором с постоянными параметрами.

На основании анализа результатов исследований можно сделать вывод, что для управления теплообменными аппаратами СКВ полезно использовать комбинированный ПИД-регулятор с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией, поскольку система управления с таким регулятором имеет лучшие показатели качества управления в сравнении с системой управления на основе классического ПИД-регулятора с постоянными параметрами.

## ВЫВОДЫ

В разработанной схеме комбинированного ПИД-регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией реализована автостройка его параметров. Как следует из полученных результатов исследований, комбинированный ПИД-регулятор с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией обладает лучшими динамическими характеристиками в сравнении с классическим ПИД-регулятором. Используемая в регуляторе фаззи ПД-составляющая и нечеткая динамическая коррекция позволяет уменьшить перерегулирование, снизить время установления регулируемого параметра. Схема разработанного регулятора с фаззи ПД-составляющей и нечеткой динамической коррекцией рекомендуется для использования в нелинейных управляемых системах, в частности СКВ при отсутствии полной информации об объекте управления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Вычужанин, В. В.** Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках [Текст] : монография / В. В. Вычужанин. — Одесса : ОНМУ, 2009. — 206 с.
- [2] **Деменков, Н. П.** Нечеткое управление в технических системах [Текст] : учеб. пособие / Н. П. Деменков. — М. : Изд-во МГГУ им. Баумана, 2005. — 200 с.
- [3] **Кондратенко, Ю. П.** Синтез та аналіз властивостей нечітких регуляторів для стабілізації температури в суднових приміщеннях [Текст] / Ю. П. Кондратенко, Г. В. Кондратенко, Т. Л. Мельник // Науч.-техн. сб. «Автоматизация судовых технических средств». — Одесса : ОНМА. — 2007. — Вып. 12. — С. 53–67.
- [4] **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. — С.Пб. : БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.
- [5] **Ротач, В. Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами [Текст] / В. Я. Ротач. — М. : Энергаториздат, 1985. — 296 с.
- [6] **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М. : Горячая линия–Телеком, 2006. — 383 с.

- [7] **Mamdani, E. H.** Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant [Text] / E. H. Mamdani // Proc. IEEE. — 1974. — № 12. — P. 1585–1588.
- [8] **Rotach, V.** On Connection between Traditional and Fuzzy PID Regulators [Text] / V. Rotach // 6-th Zittau Fuzzy-Colloquium Germany. — 1998. — P. 86–90.
- [9] **Yesil, E.** Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers [Text] / E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin // Word Automation Congress. — 2004. — Vol. 17. — P. 501–506.