

УДК 004.81

## КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОМ ПЕЛЬТЬЕ

М. В. Бобырь<sup>1</sup> [0000-0002-5400-6817], А. А. Асеев<sup>2</sup> [0009-0007-8271-7660]

<sup>1, 2</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

<sup>1</sup>maxboby@gmail.com, <sup>2</sup>asseeff.artem@gmail.com

### **Аннотация**

Представлена онтологическая модель системы управления термоэлементом Пельтье. Онтология описывает ее состав, выделяя объекты, процессы преобразования в объектах и атрибуты связей между ними. На основе разработанной онтологической модели спроектирована каскадная система управления, объединяющая ПИД-регулятор, нечетко-цифровой фильтр и экспоненциально усредняющий фильтр, причем ее когнитивное поведение основано на правилах нечеткой логики. Улучшение динамических характеристик переходных процессов системы управления термоэлементом Пельтье достигается за счет применения модели математических и онтологических решений, при этом каскадная система управления обеспечивает снижение амплитуды первой гармоники управляющего сигнала на 12% и сокращает время переходного процесса на 31.9%.

**Ключевые слова:** онтология, нечеткая логика, ПИД-регулятор, нечетко-цифровой фильтр, экспоненциально усредняющий фильтр.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сложные технические системы в процессе проектирования требуют формализованного описания структуры системы и взаимодействия ее элементов. При традиционном подходе функционирование системы часто представляется в виде структуры «черный ящик», что не позволяет анализировать причинно-следственные связи обработки сигналов в ней. Это приводит к формированию слабо формализованных решений, затрудняющих анализ, модификацию и масштабирование системы. Одним из подходов, направленных на устранение указанного ограничения, является когнитивное моделирование, позволяющее формализовать состав системы, типы объектов внутри нее, процессы и связи между ними. При этом онтология в системе управления (СУ) позволяет формировать

единую интерпретацию архитектуры и обеспечивать согласованность между физическими процессами, аппаратной реализацией и вычислительными алгоритмами [1, 2].

Отсутствие онтологии в задаче управления сложными системами порождает два недостатка. Во-первых, инженер вынужден мысленно отслеживать всю цепочку процессов преобразования сигналов, что без явного описания и формализации может стать источником ошибок. Во-вторых, любое изменение системы управления (например, замена датчика) требует глубокого понимания зависимостей внутри нее, превращая сопровождение в трудоемкий процесс.

Рассмотрим задачу синтеза онтологии на примере управления термоэлементом [3, 4]. Как правило, в таких системах управления для их регулировки используется ПИД-регулятор [5–7]. Однако классическая реализация ПИД-управления обладает рядом ограничений. Во-первых, это трудоемкость ручной настройки коэффициентов ПИД-регулятора: пропорционального, интегрального и дифференциального [5, 6]. Во-вторых, это значительный скачок амплитуды первой гармоники управляющего сигнала при ПИД-регулировании [8, 9], приводящий к повышенному износу силовых элементов. Третьим ограничением является длительное время переходного процесса. Для преодоления перечисленных ограничений используются различные подходы. Трудоемкость настройки коэффициентов ПИД-регуляторов упрощается методами нейро-нечеткой и генетической оптимизации [6, 11], а также самонастраивающимся нечетким ПИД-регулятором [10], где скачок амплитуды управляющего сигнала уменьшался за счет использования двойного экспоненциального усреднения [12], а также нечеткого блока для адаптивной регуляции [14, 15]. Время переходного процесса сокращалось с помощью предиктивного управления [13], оптимизирующего сигнал с явными ограничениями на его изменение. Однако ПИД-регулятор используется только для компенсации отклонения между текущим и заданным целевыми значениями, в то время как онтология позволяет выполнять анализ динамики всех сигналов системы, участвующих в процессе управления. В предлагаемом подходе осуществляется контроль прохождения всех сигналов в системе управления термоэлементом. Выделяются этапы съема термистором и аналого-цифро-

---

вого преобразования сигнала измеренной температуры с термоэлемента, вычисления разницы между измеренной и заданной температурами и анализа динамики сигнала ПИД-регулятора в предыдущий и текущий моменты времени. Это обеспечивает интерпретируемость каждого управляющего решения, являющаяся основой объясняемого искусственного интеллекта. Система не только приводит управляемую величину к заданному значению, но и адаптирует динамику сигнала по явно сформулированным правилам, доступным для анализа и модификации. Ранее в работе [17] было предложено решение, в котором отсутствовало онтологическое описание системы. В настоящем исследовании указанный недостаток устранен путем описания всех вышеперечисленных процедур, используемых в каскадной системе управления, объединяющей ПИД-регулятор, нечетко-цифровой фильтр (НЦФ) и экспоненциально усредняющий фильтр (ЭУФ) с адаптивным коэффициентом сглаживания. Разработанная онтологическая модель формализует состав системы, типы сигналов, вычислительные и физические процессы, а также причинно-следственные связи между ними. Такой подход позволяет рассматривать математическую модель и алгоритмы управления как прямое следствие формализованной онтологической структуры, обеспечивая интерпретируемость, воспроизводимость и ее масштабируемость.

### **ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОМ**

Онтологическая модель системы управления термоэлементом (ОМСУТ) организует структуру системы управления и описывает взаимодействие между ее компонентами. ОМСУТ задается в виде следующего кортежа:

$$O = \langle Oo_{i=1}^a, Oo_{i=1}^d, O\pi_{i=1}^p, Oc_{i=1}^s \rangle, \quad (1)$$

где  $Oo$  – онтологическая модель классов объектов ( $a = 1 \div 6$ ,  $a$  – количество аналоговых объектов;  $d = 1 \div 8$ ,  $d$  – количество цифровых объектов);  $O\pi$  – онтологическая модель процесса ( $p = 1 \div 16$ ,  $p$  – количество процессов);  $Oc$  – онтологическая модель сигналов ( $s = 1 \div 25$ ,  $s$  – количество сигналов).

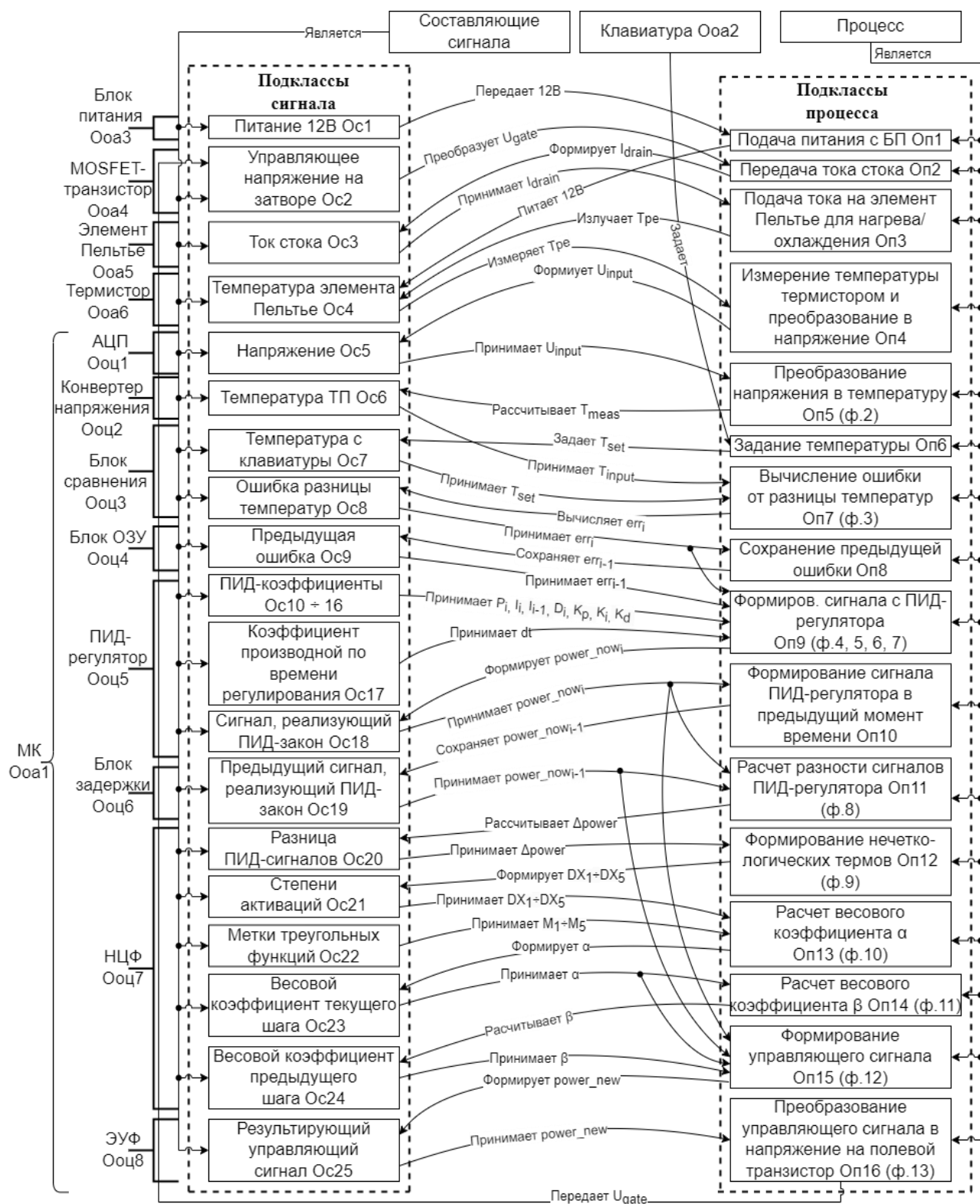


Рис. 1. Онтологическая модель каскадного управления термоэлементом.

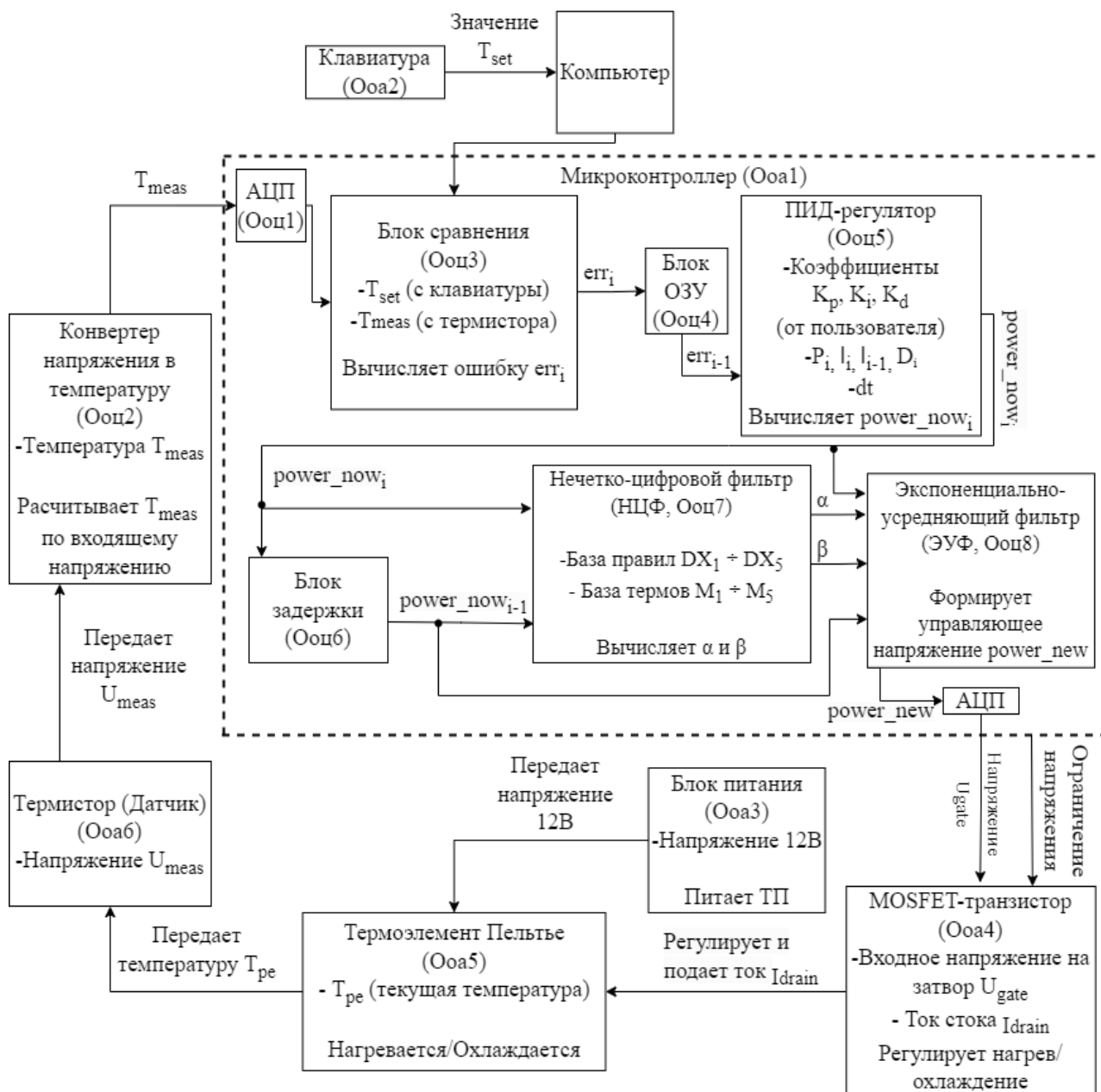


Рис. 2. Структурная схема каскадного управления термоэлементом

Модель определяет состав объектов системы, сигналов и процессы их преобразования (рис. 1), а также связи между ними (рис. 2). В рамках онтологической модели выделяются как физические объекты (термоэлемент Пельтье, термистор, MOSFET-транзистор), так и цифровые вычислительные блоки, а также логические и алгоритмические процессы, протекающие в микроконтроллере.

На уровне аналоговых объектов формируются электрические сигналы, соответствующие реальным физическим величинам, относящимся к температуре,

току или сопротивлению. Эти сигналы существуют непосредственно в физической среде и характеризуют состояние температуры на термоэлементе Пельтье (ТП) и связанных с ним компонентов. Датчики преобразуют физические величины в аналоговые электрические сигналы, пропорциональные измеряемым параметрам. Такие сигналы доступны для регистрации аппаратными средствами и подаются на вход аналого-цифрового преобразователя внутри микроконтроллера (МК), где их аналоговые значения переходят в цифровые. Значения цифровых сигналов используются в алгоритмах управления, программно реализованных в МК. На основе этих данных выполняются вычисления, включая определение ошибки регулирования и формирование управляющего воздействия. Результатом вычислений является электрический управляющий сигнал, подаваемый на исполнительные элементы системы, в частности на затвор MOSFET-транзистора, который формирует регулирующий сигнал тока стока и передает его на элемент Пельтье. Обратная связь в системе управления осуществляется путем определения ошибки регулирования между заданной температурой ( $T_{set}$ ) и измеренной с поверхности ТП ( $T_{meas}$ ).

Таким образом, онтология процессов управления включает задание целевой температуры, вычисление ошибки регулирования, формирование сигнала ПИД-регулятора, адаптивную фильтрацию ПИД-сигнала методами нечеткой логики, управление напряжением на затворе MOSFET-транзистора и обратную связь по температуре (рис. 2).

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОМ**

Математическая модель системы управления формируется на основе онтологической модели ОМСУТ и соответствует описанным в ней процессам и сигналам. Каждый математический алгоритм реализует конкретный онтологический процесс и использует сигналы, источники которых заданы в онтологии (рис. 1).

### **Формирование цифрового сигнала температуры**

Аналоговая часть системы включает блок питания, который подает постоянное напряжение 12 В на ТП. Управление нагревом/охлаждением ТП осуществляется током стока ( $I_{drain}$ ) MOSFET-транзистора, где управляющее напряжение

---

на затворе ( $U_{gate}$ ) формируется каскадной системой (включающей ПИД-регулятор, НЦФ и ЭУФ), в зависимости от температуры на термоэлементе ( $T_{pe}$ ).

Температура на термоэлемент измеряется с помощью термистора. Аналоговый сигнал напряжения ( $U_{meas}$ ) от термистора передается в аналого-цифровой преобразователь МК, где по формуле

$$T_{meas} = 1.148 \left( U_{meas} \frac{5}{1024} \right)^2 - 28.45 \left( U_{meas} \frac{5}{1024} \right) + 87.85,$$

где 5 – значение опорного напряжения АЦП, 1024 – разрядность АЦП (10-разрядный), осуществляется преобразование сигнала в цифровое значение температуры ( $T_{meas}$ ), которое в дальнейшем используется для управления ПИД-регулятором:

Коэффициенты полиномиальной регрессии был подобраны экспериментальным путем. В рамках эксперимента изменялась температура на термоэлементе и измерялась независимым прибором, в нашем эксперименте использовался тепловизор. Затем значения температуры фиксировались и сопоставлялись со значениями аналогового напряжения, поступающими от терморезистора. Далее на основе однофакторной регрессии находились коэффициенты полиномиального уравнения (2), которые составили 1.148, 28.45, 87.85 соответственно.

### Реализация ПИД-закона

ПИД-регулятор стремится минимизировать ошибку регулирования  $err_i$ , определяемую блоком сравнения (рис. 1), как разность между заданной температурой ( $T_{set}$ ) и измеренной температурой терморезистором ( $T_{meas}$ ) по формуле

$$err_i = T_{set} - T_{meas}.$$

Формирование сигнала ПИД-закона осуществляется на основе трех составляющих: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Пропорциональная составляющая ( $P_i$ ) определяется текущей величиной ошибки регулирования ( $err_i$ ) по формуле

$$P_i = err_i.$$

Интегральная составляющая ( $I_i$ ) рассчитывается по методу прямоугольников (метод Эйлера)

$$I_i = I_{i-1} + \text{err}_i \cdot dt,$$

где  $I_{i-1}$  – значение интегральной составляющей, накопленное на предыдущем шаге дискретизации;  $dt$  – период дискретизации системы.

Для исключения насыщения интегратора вводится ограничение  $I_{\min} \leq I_i \leq I_{\max}$ .

Дифференциальная составляющая ( $D_i$ ) аппроксимировалась обратной разностью по формуле

$$D_i = \frac{\text{err}_i - \text{err}_{i-1}}{dt},$$

где  $\text{err}_{i-1}$  – значение ошибки регулирования на предыдущем шаге дискретизации.

После вычисления отдельных составляющих формируется итоговый управляющий сигнал ПИД-регулятора. Сигнал, реализующий ПИД-закон ( $\text{power\_pow}_i$ ) на  $i$ -м шаге дискретизации, вычисляется по формуле

$$\text{power\_pow}_i = K_p P_i + K_i I_i + K_d D_i,$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – настраиваемые коэффициенты ПИД-регулятора.

Стоит отметить, что на первом шаге ( $i = 0$ ) инициализация и хранение данных происходят следующим образом: принимается  $\text{err}_{i-1} = 0$ ,  $I_{i-1} = 0$ . После каждого вычисления значение  $\text{err}_i$  сохраняется в переменную  $\text{err}_{i-1}$  (с использованием блока ОЗУ) для передачи этого сигнала на следующем шаге управления. Аналогично значение  $\text{power\_pow}_i$  сохраняется как  $\text{power\_pow}_{i-1}$  (с использованием блока задержки) для работы НЦФ и ЭУФ.

### **Нечетко-цифровая фильтрация**

НЦФ служит для анализа изменения сигнала ПИД-регулятора и адаптивного расчета весового коэффициента  $\alpha$  для последующего экспоненциально-усредняющего фильтрования.

Входной переменной НЦФ является разность между текущим и предыдущим значениями выходного сигнала ПИД-регулятора ( $\Delta \text{power}$ ). Она рассчитывается по формуле

$$\Delta \text{power} = \text{power\_now}_i - \text{power\_now}_{i-1},$$

соответствующей онтологическому процессу, выполняемым НЦФ.

Величина  $\Delta \text{power}$  характеризует «резкость» изменения сигнала ПИД-регулятора, содержит информацию о его направлении и описывается пятью треугольными функциями принадлежности (рис. 3), причем  $DX_1$  и  $DX_5$  имеют значения в виде трапеций, а  $DX_2$ ,  $DX_3$  и  $DX_4$  – в виде треугольников. Таким образом, последняя формула реализует базовую когнитивную операцию, выделяющую динамику поведения  $\Delta \text{power}$ , которая далее используется для принятия управляющих решений в рамках нечетко-логических правил. Для формирования базы нечетко-логических правил  $\Delta \text{power}$  конвертируется в значения степеней активаций ( $DX_1 \div DX_5$ ) по формулам

$$DX_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta \text{power} \in [0; 1.2], \\ \frac{2.4 - \Delta \text{power}}{2.4 - 1.2}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [1.2; 2.4], \\ 0, & \text{если } \Delta \text{power} \in [-\infty; 0] \cup [2.4; +\infty], \end{cases}$$

$$DX_2 = \begin{cases} \frac{\Delta \text{power} - 1.2}{2.4 - 1.2}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [1.2; 2.4], \\ \frac{3.6 - \Delta \text{power}}{3.6 - 2.4}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [2.4; 3.6], \\ 0, & \text{если } \Delta \text{power} \in [-\infty; 1.2] \cup [3.6; +\infty], \end{cases}$$

$$DX_3 = \begin{cases} \frac{\Delta \text{power} - 2.4}{3.6 - 2.4}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [2.4; 3.6], \\ \frac{4.8 - \Delta \text{power}}{4.8 - 3.6}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [3.6; 4.8], \\ 0, & \text{если } \Delta \text{power} \in [-\infty; 2.4] \cup [4.8; +\infty], \end{cases}$$

$$DX_4 = \begin{cases} \frac{\Delta \text{power} - 3.6}{4.8 - 3.6}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [3.6; 4.8], \\ \frac{6.0 - \Delta \text{power}}{6.0 - 4.8}, & \text{если } \Delta \text{power} \in [4.8; 6.0], \\ 0, & \text{если } \Delta \text{power} \in [-\infty; 3.6] \cup [6.0; +\infty], \end{cases}$$

$$DX_5 = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta_{\text{power}} \in [-\infty; 4.8] \cup [7.2; +\infty], \\ \frac{\Delta_{\text{power}} - 4.8}{6.0 - 4.8}, & \text{если } \Delta_{\text{power}} \in [4.8; 6.0], \\ 1, & \text{если } \Delta_{\text{power}} \in [6.0; 7.2]. \end{cases}$$

Полученным степеням активаций функций принадлежности соответствуют пять нечетко-логических правил:

- Если  $DX = DX_1$ , то  $\alpha = DX_1$ .
- Если  $DX = DX_2$ , то  $\alpha = DX_2$ .
- Если  $DX = DX_3$ , то  $\alpha = DX_3$ .
- Если  $DX = DX_4$ , то  $\alpha = DX_4$ .
- Если  $DX = DX_5$ , то  $\alpha = DX_5$ .

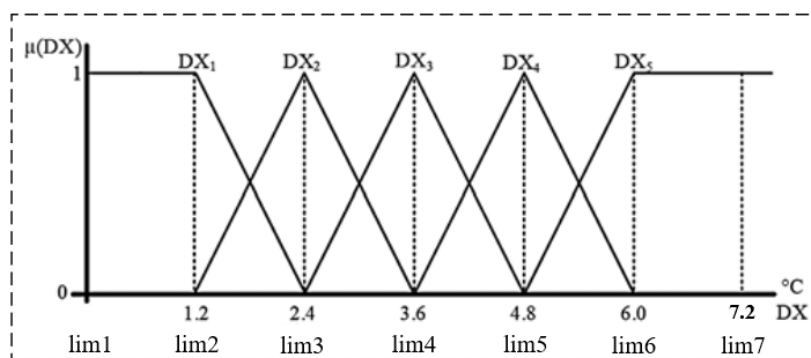


Рис. 3. Входные функции принадлежности переменной  $\Delta_{\text{power}}$

Выходная лингвистическая переменная коэффициента сглаживания ( $\alpha$ ) также имеет пять термов с четкими значениями (синглтонами):  $M_1 = 0.4$ ,  $M_2 = 0.5$ ,  $M_3 = 0.6$ ,  $M_4 = 0.7$ ,  $M_5 = 0.8$  (рис. 4).

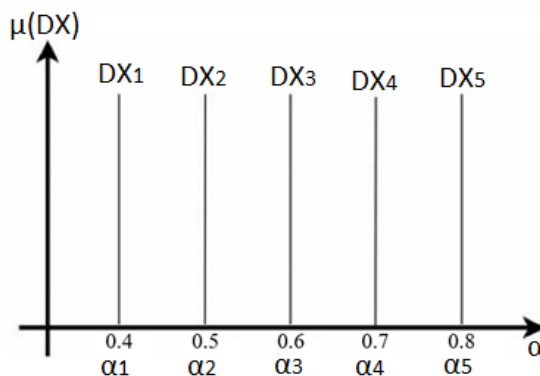


Рис. 4. Выходные синглтонные значения функций принадлежности.

Для дефаззификации четкого численного значения коэффициента ( $\alpha$ ) применен упрощенный метод центра тяжести:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^5 DX_i \cdot \alpha_i}{\sum_{i=1}^5 DX_i}.$$

Расчет весового коэффициента ( $\beta$ ) для ЭУФ выполнен по формуле

$$\beta = 1 - \alpha.$$

### Экспоненциально усредняющая фильтрация

Экспоненциально-усредняющая фильтрация (ЭУФ) выполняет финальное адаптивное сглаживание передаваемого из НЦФ и ПИД-регулятора на затвор полевого транзистора управляющего сигнала ( $power\_new$ ) по формуле

$$power_{new} = \alpha power_{now}_i + \beta power_{now}_{i-1}.$$

В отличие от классического экспоненциально-усредняющего фильтра с фиксированным коэффициентом сглаживания, коэффициент  $\alpha$  динамически изменяется в диапазоне [0.4, 0.8], а  $\beta$  – в диапазоне [0.2, 0.6].

При резких изменениях  $\Delta power$  коэффициент  $\alpha$  становится малым (приближается к 0.4), что подавляет высокочастотные выбросы; при плавных изменениях  $\alpha$  близок к 0.8, что обеспечивает быстрый отклик системы.

По вышеописанному принципу каскадная связка ПИД-регулятора с НЦФ + ЭУФ реализует фильтр нижних частот с адаптивной полосой пропускания, устраняя недостатки классического ПИД.

### Формирование управляющего воздействия

Формула

$$U_{gate} = power\_new \cdot 2.5,$$

где 2.5 – масштабирующий коэффициент, соответствует онтологическому процессу передачи управляющего аналогового сигнала на полевой транзистор и обеспечивает переход от цифрового сигнала  $power\_new$  к аналоговому сигналу  $U_{gate}$ . Процесс осуществляется в ЦАП микроконтроллера. Таким образом регулируется напряжение на затворе MOSFET-транзистора ( $U_{gate}$ ), которое изменяет его ток

---

стока ( $I_{\text{drain}}$ ). Ток стока полевого транзистора в свою очередь приводит к изменению тока на термоэлементе Пельтье и, как следствие, ведет к изменению его температуры ( $T_{\text{pe}}$ ). Затем температура измеряется термистором и передается в микроконтроллер через АЦП ( $T_{\text{meas}}$ ). По такому принципу образуется обратная связь. Описанные выше онтологическая и математическая модели формируют когнитивную модель управления термоэлементом.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОМ

Для верификации предложенной модели и оценки ее эффективности по схеме, представленной на рис. 1, была собрана экспериментальная установка. В программном обеспечении микроконтроллера реализованы все процессы, описанные в разделе «Математическая модель управления термоэлементом». Период дискретизации системы ( $dt$ ), рассчитанный суммой всех задержек внутри нее, установлен равным 0.6 с. В качестве целевой температуры выбрано значение  $T_{\text{set}} = 45^\circ\text{C}$ . Эксперимент состоял в сравнении показателей работоспособности двух систем управления: с классическим ПИД-регулятором (1) и каскадной системой на основе комбинации ПИД+НЦФ+ЭУФ:

1. Система с классическим ПИД-регулятором. Коэффициенты ПИД-регулятора:  $K_p = 2.0$ ,  $K_i = 0.05$ ,  $K_d = 1.0$ ,  $dt = 0.01$ .

2. Каскадная система ПИД+НЦФ+ЭУФ. Параметры ПИД-регулятора оставались неизменными. Параметры НЦФ (границы функций принадлежности) установлены, как описано в п. «Нечетко-цифровая фильтрация».

В процессе измерялись и контролировались значения трех параметров: совпадение измеренной ( $T_{\text{meas}}$ ) и заданной ( $T_{\text{set}}$ ) температур, выброс амплитуды первой гармоники управляющего сигнала и время переходного процесса ( $U_1$ ), т. е. момент времени, когда измеренная температура совпадет с заданной  $T_{\text{meas}} = T_{\text{set}}$ .

Результаты, полученные при классическом управлении ПИД-регулятором, представлены на рис. рис. 5а. При подаче управляющего напряжения на затвор MOSFET-транзистора (сигнал `power_new`) наблюдается ярко выраженный скачок напряжения в момент начала регулирования. Максимальная амплитуда  $U_1$  этого скачка ограничена АЦП 100 усл. ед. (в действительности может быть и больше).

Временная ось оцифрована в отсчетах с периодом 0.6 с. Момент, когда сигнал измеренной температуры  $T_{\text{meas}}$  становится равным и остается в зоне допустимого отклонения от сигнала заданной температуры  $T_{\text{set}}$ , соответствует 361-му отсчету. Таким образом, время регулирования  $T_{\text{B\_PID}}$  вычисляется по формуле

$$T_{\text{B\_PID}} = (N - 1) \cdot dt = (361 - 1) \cdot 0.6 = 216 \text{ с.}$$

Значение напряжения управляющего сигнала  $U_1$  при опорном напряжении, равном 5 В определяется по формуле

$$U_1 = 5.0 \cdot \frac{100}{100} = 5.0 \text{ В.}$$

Результаты, полученные при каскадном управлении с комбинацией ПИД + НЦФ + ЭУФ, представлены на рис. 5б. При подаче управляющего напряжения на затвор MOSFET-транзистора (сигнал `power_new`) демонстрируется значительно более плавный скачок напряжения  $U_1$  по сравнению с классическим управлением при помощи ПИД-регулятора, амплитуда  $U_1$  не превышает 88 усл. ед. Выход температуры ( $T_{\text{meas}}$ ) на заданный режим происходит на 246-м отсчете. Время регулирования ( $T_{\text{B}}$ ) вычисляется по формуле

$$T_{\text{B}} = (246 - 1) \cdot 0.6 = 147 \text{ с.}$$

Значению напряжения управляющего сигнала  $U_1$  соответствует значение, рассчитанное по формуле

$$U_1 = 5.0 \cdot \frac{88}{100} = 4.4 \text{ В.}$$

Основные показатели процесса управления приведены в табл. 1.

Табл. 1: Сравнительные характеристики систем управления

Параметр	Классический ПИД	ПИД + НЦФ + ЭУФ	Абсолютное изменение	Относительное улучшение, %
Время регулирования, $T_B$ , с	216	147	-69	31.9
Амплитуда первого скачка $power\_new$ , у.е.	100	88	-12	12.0
Усредненное напряжение скачка, $U_1$ , В	5.0	4.4	-0.6	12.0

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают преимущество каскадной системы управления ПИД + НЦФ + ЭУФ, состоящее в сокращении времени регулирования и снижении амплитуды управляющего сигнала.

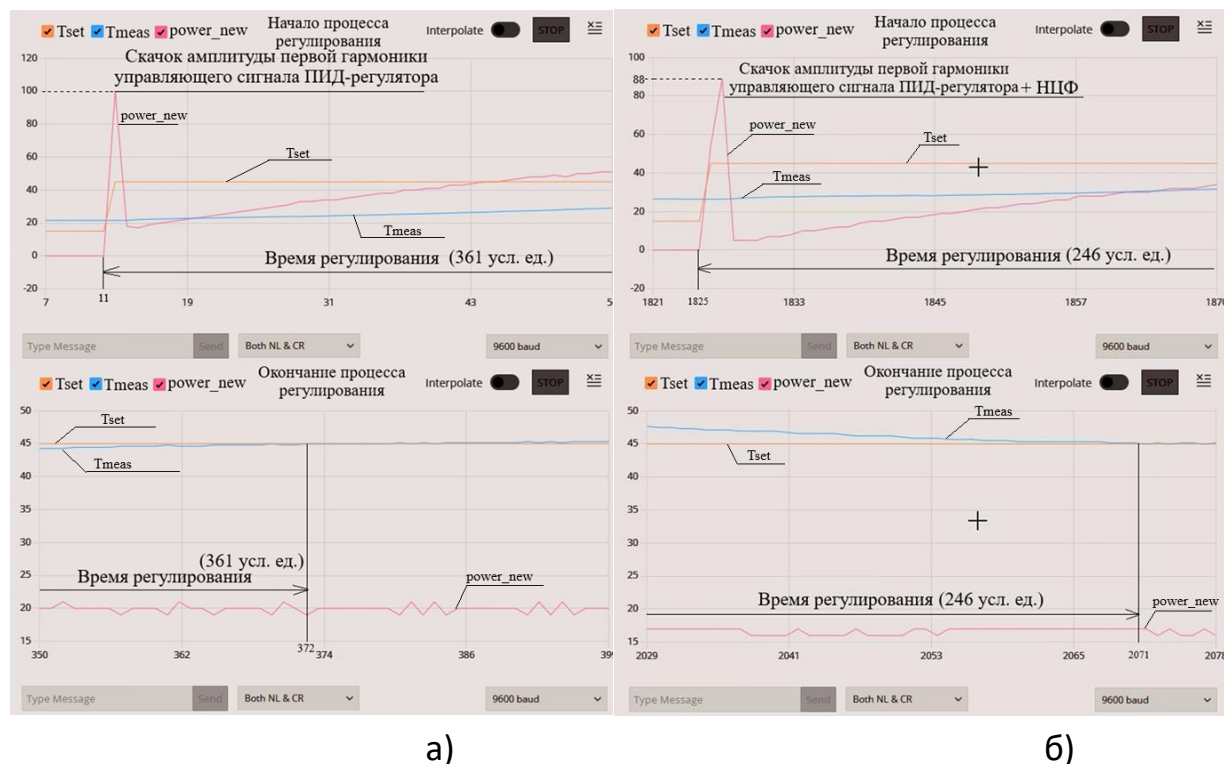


Рис. 5. Процессе управления термоэлементом: а) на основе классического ПИД-регулятора, б) каскадная система ПИД + НЦФ + ЭУФ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана когнитивная модель, включающая онтологическую и математическую модели управления термоэлементом Пельтье. Онтологическая модель формализует структуру системы, типы сигналов и процессы, а математическая модель реализует вычислительную интерпретацию этих процессов. Предложенная каскадная система управления, объединяющая ПИД-регулятор, нечетко-цифровой фильтр и экспоненциально усредняющий фильтр, обеспечивает адаптивную обработку управляющего сигнала в зависимости от его динамики. Экспериментальные результаты подтвердили эффективность представленной системы, поскольку время переходного процесса сократилось на 31.9%, а амплитуда управляющего сигнала снизилась на 12% по сравнению с классическим ПИД-регулятором.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 075-03-2026-489.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grebeshkov A., Shebalov R., Gorshkov S., Mushtak O. Ontological modeling of enterprises: technologies and methods // Book, TriniData LLC & Ural Federal University. 2019. P. 104–116. ISBN: 978-5-7996-2580-1.
2. Krieken E., Acar E., van Harmelen F. Analyzing Differentiable Fuzzy Logic Operators // Artificial Intelligence. 2022. Vol. 302, 103602. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2021.103602>
3. Jalahi A., Linke M., Weltzien C., Mahajan P. Developing an Arduino-based control system for temperature-dependent gas modification in a fruit storage container // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 198, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107126>
4. Loche-Moinet F., Theolier L., Woirgard E. Electro-thermo-mechanical modelling of a SiC MOSFET transistor under non-destructive short-circuit // Microelectronics Reliability. 2023. Vol. 150, 115143. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115143>
5. Leva A., Zamuner M. Model Parametrisation and Rule Selection for Problem-tailored PID Autotuning // IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, Issue 7. P. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.008>
6. Bassi S.J., Gbenga E.D., Abidemi A., Oyewola D., Mohammed B.K. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems // Heliyon. 2022. Vol. 8, Issue 5, e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>.
7. Keviczky L., Bányász C. Adaptive Iterative Method to Improve the Robustness of PID Regulators // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Issue 12. P. 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.303>

8. Signe R.K., Motto F.B. Fuzzy-PID controller based sliding-mode for suppressing low frequency oscillations of the synchronous generator // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Issue 15, e35035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35035>
  9. *Xian W., Qi Q., Liu W., Liu Y., Li D., Wang Y.* Control of quadrotor robot via optimized nonlinear type-2 fuzzy fractional PID with fractional filter: Theory and experiment // *Aerospace Science and Technology*. 2024. Vol. 151, 109286. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109286>.
  10. *Outanoute M., Selmani A., Oubehar H., Snoussi A., Guerbaoui M., Ed-Dahhak A., Lachhab A., Bouchikhi B.* Self Tuning Fuzzy-PID Controller in Real Time Greenhouse Temperature Control // Conference: The Third International Conference on Optimization and Applications (ICOA 2017) At: Meknes, Morocco; 2017.
  11. *Bobyry M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A.* The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 117, 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>
  12. *Ma Z., Pan T., Tian J.* Deep reinforcement learning optimized double exponentially weighted moving average controller for chemical mechanical polishing processes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. Vol. 197. P. 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.049>
  13. *Bobyry M., Titov V., Belyaev A.* Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 79, 01052. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901052>
  14. *Barelli L., Bidini G., Arce R.* Fuzzy Logic Regulator for the Performance Improvement and the Energy Consumption Reduction of an Industrial Chiller // Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008, 41910. <https://doi.org/10.1115/IMECE2003-41910>
  15. *Bobyry M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N.* A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 117, 105629. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>
  16. *Bobyry M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S.* Shade recognition of the color label based on the fuzzy clustering // *Informatics and Automation*. 2021. Vol. 20 (2). P. 407–434. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>
-

17. Бобырь М.В., Милостная Н.А., Ноливос К.А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора в задаче управления термоэлементом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Том 23.  
[https://doi.org/ 10.17587/mau.23.473-480](https://doi.org/10.17587/mau.23.473-480)

---

## COGNITIVE MODEL FOR CONTROL OF A PELTIER THERMOELEMENT

M. V. Bobyr<sup>1</sup> [0000-0002-5400-6817], A. A. Aseev<sup>2</sup> [0009-0007-8271-7660]

<sup>1,2</sup>South-West State University, Kursk, Russia

<sup>1</sup>maxbobyr@gmail.com, <sup>2</sup>asseeff.artem@gmail.com

### **Abstract**

The article presents an ontological model of a control system for a Peltier thermoelectric element. The ontology describes the structure of the system by identifying objects, transformation processes within these objects, and the attributes of the relationships between them. Based on the developed ontological model, a cascade control system has been designed, integrating a PID controller, a fuzzy-digital filter, and an exponential-averaging filter, with its cognitive behavior governed by fuzzy logic rules. Improvement of the dynamic characteristics of transient processes in the Peltier element control system is achieved through the application of the mathematical and ontological solutions specified in the model. The cascade control system reduces the amplitude of the first harmonic of the control signal by 12% and decreases the transient response time by 31.9%.

**Keywords:** *ontology, fuzzy logic, PID-controller, fuzzy-digital filter, exponential-averaging filter.*

### **Acknowledgements**

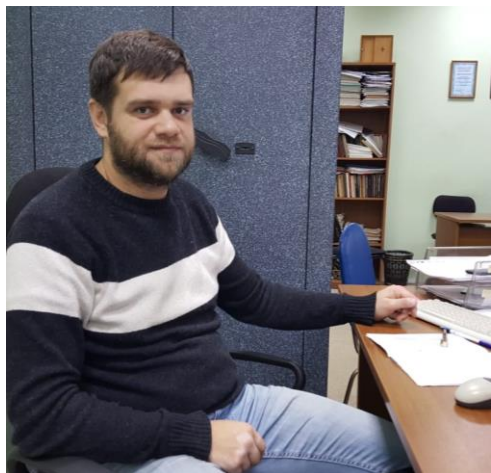
This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education under State Contract No. 075-03-2026-489.

## REFERENCES

1. Grebeshkov A., Shebalov R., Gorshkov S., Mushtak O. Ontological modeling of enterprises: technologies and methods // Book, TriniData LLC & Ural Federal University. 2019. P. 104–116. ISBN: 978-5-7996-2580-1.
2. Krieken E., Acar E., van Harmelen F. Analyzing Differentiable Fuzzy Logic Operators // Artificial Intelligence. 2022. Vol. 302, 103602. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2021.103602>
3. Jalahi A., Linke M., Weltzien C., Mahajan P. Developing an Arduino-based control system for temperature-dependent gas modification in a fruit storage container // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 198, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107126>
4. Loche-Moinet F., Theolier L., Woirgard E. Electro-thermo-mechanical modelling of a SiC MOSFET transistor under non-destructive short-circuit // Microelectronics Reliability. 2023. Vol. 150, 115143. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115143>
5. Leva A., Zamuner M. Model Parametrisation and Rule Selection for Problem-tailored PID Autotuning // IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, Issue 7. P. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.008>
6. Bassi S.J., Gbenga E.D., Abidemi A., Oyewola D., Mohammed B.K. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems // Heliyon. 2022. Vol. 8, Issue 5, e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>.
7. Keviczky L., Bányász C. Adaptive Iterative Method to Improve the Robustness of PID Regulators // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Issue 12. P. 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.303>
8. Signe R.K., Motto F.B. Fuzzy-PID controller based sliding-mode for suppressing low frequency oscillations of the synchronous generator // Heliyon. 2024. Vol. 10, Issue 15, e35035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35035>
9. Xian W., Qi Q., Liu W., Liu Y., Li D., Wang Y. Control of quadrotor robot via optimized nonlinear type-2 fuzzy fractional PID with fractional filter: Theory and experiment // Aerospace Science and Technology. 2024. Vol. 151, 109286. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109286>.

10. *Outanoute M., Selmani A., Oubehar H., Snoussi A., Guerbaoui M., Ed-Dahhak A., Lachhab A., Bouchikhi B.* Self Tuning Fuzzy-PID Controller in Real Time Greenhouse Temperature Control // Conference: The Third International Conference on Optimization and Applications (ICOA 2017) At: Meknes, Morocco; 2017.
11. *Bobyр M.V., Milostnaya N.A., Bulatnikov V.A.* The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117, 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>
12. *Ma Z., Pan T., Tian J.* Deep reinforcement learning optimized double exponentially weighted moving average controller for chemical mechanical polishing processes // Chemical Engineering Research and Design. 2023. Vol. 197. P. 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.049>
13. *Bobyр M., Titov V., Belyaev A.* Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 79, 01052. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901052>
14. *Barelli L., Bidini G., Arce R.* Fuzzy Logic Regulator for the Performance Improvement and the Energy Consumption Reduction of an Industrial Chiller // Conference: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008, 41910. <https://doi.org/10.1115/IMECE2003-41910>
15. *Bobyр M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N.* A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 117, 105629. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>
16. *Bobyр M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S.* Shade recognition of the color label based on the fuzzy clustering // Informatics and Automation. 2021. Vol. 20 (2). P. 407–434. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>
17. *Bobyр M.V., Milostnaya N.A., Nolivos K.A.* Combination of a fuzzy-digital filter and a PID controller in the problem of controlling a thermoelement // Mechatronics, automation, control. 2022. Vol. 23. <https://doi.org/10.17587/mau.23.473-480>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**БОБЫРЬ Максим Владимирович** – 1978 года рождения, учился в Курском государственном техническом университете (ныне – Юго-Западный государственный университет). В 2012 году защитил диссертацию на соискание доктора технических наук по специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». В настоящее время работает профессором на кафедре программной инженерии. Является председателем диссертационного совета по специальности 5.12.4 «Когнитивное моделирование».

Область научных интересов: адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, цифровая обработка изображений и распознавание образов, машинное обучение, стереозрение.

**Maksim Vladimirovich BOBYR** – born in 1978, studied at Kursk State Technical University (now South-West State University). In 2012, he defended his dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.06 Automation and Control of Technological Processes and Production. Currently, he works as a professor at the Department of Software Engineering. He is the chairman of the dissertation council for specialty 5.12.4 Cognitive Modeling.

Research interests: adaptive neuro-fuzzy inference systems, digital image processing and pattern recognition, machine learning, stereo vision.

email: maxbobyр@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5400-6817



***АСЕЕВ Артем Андреевич*** – 1999 года рождения, учится на 3 курсе аспирантуры Юго-Западного государственного университета на кафедре программной инженерии по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Область научных интересов: адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, распознавание образов.

***Aseev Artem Andreevich*** – born in 1999, 3th-year postgraduate student at the Southwestern State University, Department of Software Engineering, specialty 2.3.3 Automation and Control of Technological Processes and Production. Research interests: adaptive neuro-fuzzy inference systems, pattern recognition.

email: [asseeff.artem@gmail.com](mailto:asseeff.artem@gmail.com)

ORCID: 0009-0007-8271-7660

*Материал поступил в редакцию 25 марта 2026 года*