

**М. В. Бобырь**, д-р техн. наук, проф., maxbobyr@gmail.com,  
**Н. А. Милостная**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., nat\_mil@mail.ru,  
**К. А. Ноливос**, аспирант, cris\_93\_bep@hotmail.com,  
 Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора в задаче управления термоэлементом

На основе нечеткой логики разработана система управления термоэлементом, улучшающая характеристики устойчивости устройств, использующих в своей структуре ПИД регулятор. Данный эффект достигается за счет снижения выходного сигнала, значение которого вычисляется с помощью нечеткого цифрового фильтра. Особенностью нечеткого фильтра является использование метода отношения площадей при дефазификации выходной переменной. Ограничением данного дефазификатора является применение треугольных функций принадлежности. Экспериментальные результаты, представленные в статье, демонстрируют эффективность предложенного решения. Исследования показали, что при использовании комбинации ПИД регулятора и нечеткого цифрового фильтра время переходных процессов при управлении термоэлементом уменьшается на 16...22 %.

**Ключевые слова:** термоэлемент, система охлаждения, ПИД регулятор, нечеткая логика, нечеткий цифровой фильтр, метод отношения площадей

### Введение

Автоматизация управления производственными процессами является актуальной задачей, причем для обеспечения устойчивости необходимо обеспечить стабилизацию управляемых сигналов. Для решения такой задачи обычно используются различные регуляторы сигналов, например, ПИД регуляторы, и для настройки их параметров применяется нечеткая логика [1].

Однако процесс настройки любого регулятора — достаточно сложный процесс, даже использование машинного обучения не всегда приводит к хорошим результатам управления [2, 3].

В случае отсутствия достаточной информации о процессе управления ПИД регулятор является наиболее подходящим механизмом. При настройке трех его параметров в алгоритме регулирования контроллер обеспечивает управляющее воздействие, адаптированное к требованиям конкретного процесса. В процессе управления контроллер реагирует на ошибку, которая распознается как степень превышения заданного значения контролируемого параметра [4].

Взаимодействие ПИД регулятора и нечеткой логики для настройки его параметров не всегда приводит к хорошим результатам, в некоторых случаях характеристики ухудшаются. Тем не менее, преимущества использования ПИД регуляторов совместно с нечеткой логикой очевидны [5].

Иногда в зависимости от ожидаемого результата решения задачи из процесса настрой-

ки ПИД регулятора исключаются один или два его управляющих сигнала [6]. Но такое решение предполагает проведение дополнительных экспериментальных исследований, связанных с настройкой комбинации этих параметров. В работе [7] приведено сравнение результатов моделирование ПИ и ПД регуляторов. При этом доказано, что правильно настроенный ПИД регулятор способен привести к положительным результатам при решении задачи [8].

В раннее опубликованных научных исследованиях [9, 10] авторским коллективом были рассмотрены вопросы, связанные с работой автономной системы охлаждения режущего инструмента трехосевого фрезерного станка с ЧПУ. В данных работах для управления процессом охлаждения использовался нечеткий контроллер и как вспомогательный элемент — нечеткий цифровой фильтр [11]. Система охлаждения начинала процесс нагревания/охлаждения термоэлемента, при этом нечеткий контроллер использовался для обеспечения постоянной температуры на термоэлементе посредством управления активным элементом, в качестве которого использовался полевой транзистор. Представленные экспериментальные исследования, в целом, показали эффективность такого способа управления. Однако в течение эксперимента был определен показатель, который ухудшал качество характеристик процесса управления, — значительная длительность переходного процесса. Для устранения этого факта в структуре системы управления

предполагалась использовать ПИД регулятор. Однако сложность настройки коэффициентов ПИД регулятора усложняет процесс настройки любой системы управления, использующей его в своей структуре. Для исправления этого недостатка в статье предлагается модифицировать управляющий сигнал ПИД регулятора путем его взаимодействия с нечетким цифровым фильтром (НЦФ), предложенным в работе [12].

Проверка гипотезы совместного использования нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора (НЦФПИД регулятора) в целях упрощения настройки регулирующих параметров ПИД регулятора является основной целью данного научного исследования. Решение данной задачи позволит уменьшить время регулировки переходного процесса.

### Структурная схема системы управления термоэлементом

Система управления термоэлементом (ТЭ) включает в себя семь блоков: ПИД регулятор, НЦФ, блок преобразования напряжения в температуру, MOSFET транзистор, термистор 10 кОм, плату управления Arduino Uno и блок питания 12 В (рис. 1). ПИД регулятор и НЦФ реализованы в среде Arduino IDE в виде программной модели, которая загружается в микроконтроллер Arduino Uno.

Основной идеей реализации предложенной схемы управления является синхронизация НЦФПИД регулятора. Выходной сигнал в виде сигнала напряжения, формируемый на выходе НЦФПИД регулятора, передается на затвор полевого транзистора, который, в свою очередь, вызывает изменение тока на его стоке. При этом изменение интенсивности охлаждения/нагревания поверхности ТЭ зависит от значения колебаний тока стока полевого транзистора.

Входными сигналами НЦФПИД регулятора являются шесть переменных: значения заданной температуры на ТЭ ( $T_{setpoint}$ ); значение текущей температуры на ТЭ ( $T_{input}$ ); пропорциональный

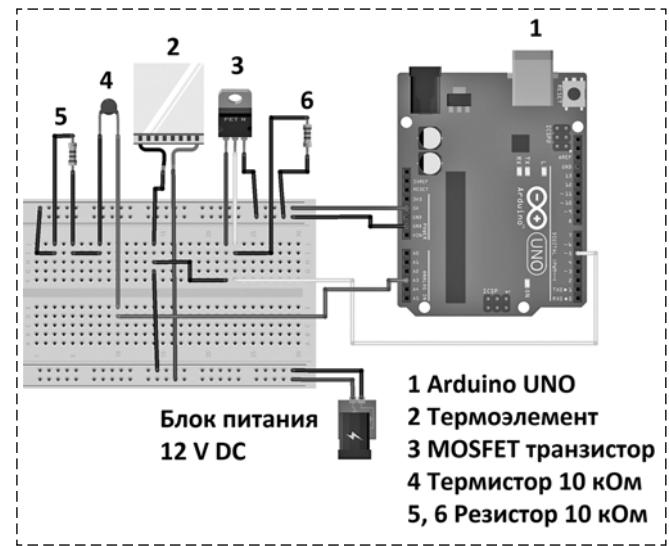


Рис. 1. Электрическая схема системы управления термоэлементом

Fig. 1. Electrical scheme of the thermoelement control system

коэффициент ( $K_p$ ); интегральный коэффициент ( $K_i$ ); дифференциальный коэффициент ( $K_d$ ); производная по времени ( $dt$ ).

Для измерения температуры с помощью термистора изменение напряжения на нем необходимо преобразовать в значения температуры (рис. 2, а). Для этого предлагается следующая процедура калибровки терморезистора [13]. Данные, полученные при измерениях, записываются в двумерный массив. В первой строке массива хранятся значения температуры ( $T$ , °C) на поверхности ТЭ, к которой прижат термистор. Данные снимаются с другого прибора, например

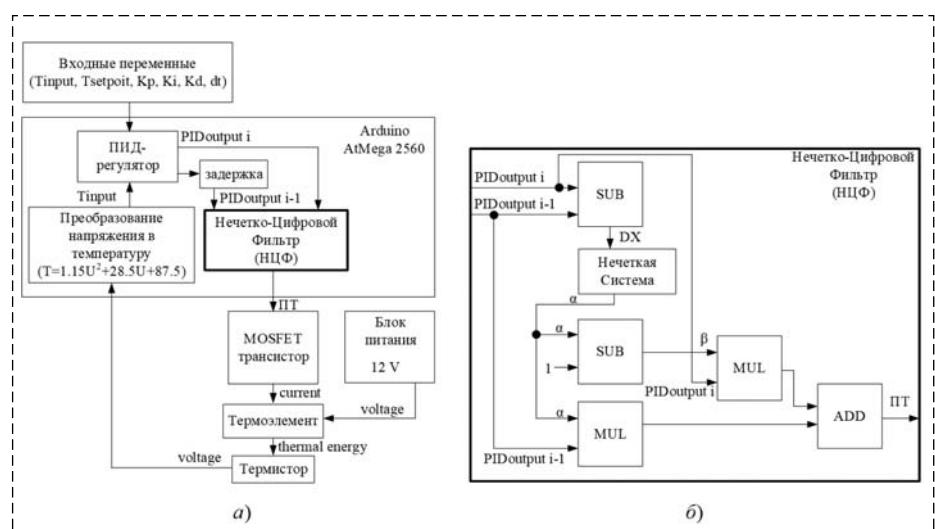


Рис. 2. Система управления термоэлементом:

а — структурная схема СУТ; б — структурная схема НЦФ

Fig. 2. Thermoelement control system:

а — structural scheme of the thermoelement control system; б — structural scheme of the fuzzy digital filter



Рис. 3. Калибровка термистора

Fig. 3. Thermistor calibration

тепловизора. Во второй строке массива записываются данные, поступающие с аналогового входа управляющей платы Arduino Uno, к которому подключен термистор. Далее на основе регрессионного анализа строится график полиномиальной регрессии 2-го порядка (рис. 3), показывающий зависимость температуры от значений напряжений на аналоговом выходе термистора:

$$T_{input} = 1,15U^2 - 28,5U + 87,9, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение на аналоговом выходе термистора.

Результатирующее значение переменной  $T_{input}$  посредством блока преобразования напряжения в температуру (см. рис. 1, а) передается на вход ПИД регулятора, также данная переменная используется в его структуре (см. Листинг 1). Таким образом, температура считывается с термистора, установленного на поверхности ТЭ.

Задачей НЦФПИД регулятора является управление интенсивностью охлаждения ТЭ путем уменьшения/увеличения напряжения, подаваемого на затвор MOSFET-транзистора, вычисляемого с помощью предложенного метода и представленного ниже в статье. При этом управляющий сигнал  $PIDoutput$  сглаживается нечетким цифровым фильтром и после этого поступает на вход MOSFET-транзистора. Текущий сигнал  $PIDoutput_i$  и сигнал задержки  $PIDoutput_{i-1}$  определяемый через заданный промежуток времени  $dt$ , поступают с выхода ПИД регулятора на вход НЦФ, причем разница между этими двумя сигналами  $DX$  является входной переменной нечеткого цифрового фильтра:

$$DX = PIDoutput_i - PIDoutput_{i-1}. \quad (2)$$

В зависимости от вычисленных значений переменной  $DX$  рассчитываются показатели фильтрации для сглаживания управляющего сигнала, поступающего на затвор MOSFET-транзистора.

### Математическая модель ПИД регулятора

Для аппаратной реализации ПИД регулятора на плату управления Arduino Uno поступают два сигнала: заданное значение температуры  $T_{setpoint}$ , которое задается пользователем, и температура термистора  $T_{input}$ , вычисленная по формуле (1). Если температура на термисторе превышает заданный предел, то в этом случае начинается процесс охлаждения/нагревания термоэлемента Пельтье.

Пусть управляющим сигналом ПИД регулятора является переменная  $power$ , которая пропорциональна изменению разности заданной и реальной температур на ТЭ:

$$power = T_{setpoint} - T_{input} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для обеспечения заданного режима работы MOSFET-транзистора введем ограничение на его режим работы:

$$power = \begin{cases} power, & \text{если } 0 < power < 100, \\ 0, & \text{если } power < 0, \\ 100, & \text{если } power > 100. \end{cases} \quad (4)$$

Корректная работа ТЭ обеспечивается путем преобразования полученного значения управляющего сигнала из диапазона 0...255 в диапазон 0...100 по формуле [14, 15]

$$power_{map} = power \cdot 100 / 255. \quad (5)$$

С учетом данного требования формула, задающая режим работы ПИД регулятора, пример вид

$$\begin{aligned} PID_{output_i} = \\ = power_{map\_i} K_P + (power_{map\_i} dt) K_I + \\ + \frac{(power_{map\_i} - power_{map\_i-1}) K_D}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $K_P$  — пропорциональная составляющая;  $K_I$  — интегрирующая составляющая;  $K_D$  — дифференцирующая составляющая;  $dt$  — шаг интегрирования [16].

Функционирование ПИД регулятора в системе управления ТЭ реализуется в микроконтроллере Arduino Uno процедурой, представленной ниже в виде псевдокода (**Листинг 1**).

### Листинг 1. Процедура работы ПИД регулятора

**Procedure** ComputePID<sub>output</sub>(Tinput, Tsetpoint, K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>d</sub>, dt)  
**Inputs:** Tinput — temperature value,

Tsetpoint — temperature limit,  
K<sub>p</sub> = 1.0 — proportional coefficient,  
K<sub>i</sub> = 0.5 — integral coefficient,  
K<sub>d</sub> = 0.5 — derivative coefficient,  
dt = 0.1 — time differential coefficient;  
previous\_power = 0

**Output:** PIDoutput<sub>i</sub> — signal for the FDF;

Begin

```
power = Tsetpoint - Tinput;
P = power;
I = power *dt;
D = (power - previous_power)/dt;
previous_power = power;
PIDoutput = P*Kp + I*Ki + D*Kd;
return PIDoutput;
```

End

### Математическая модель нечетко-цифрового фильтра

Для реализации НЦФ необходимо выполнить следующую последовательность шагов.

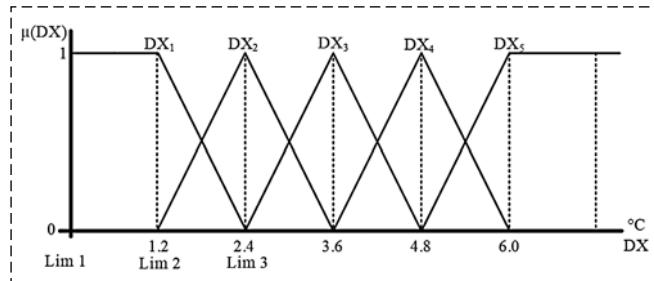


Рис. 4. Входные функции принадлежности (примечание: указано обозначение меток lim1, lim2, lim3 для первой функции принадлежности DX<sub>1</sub>)

Fig. 4. Input membership function (note: the designation of labels lim1, lim2, lim3 for the first membership function DX<sub>1</sub>)

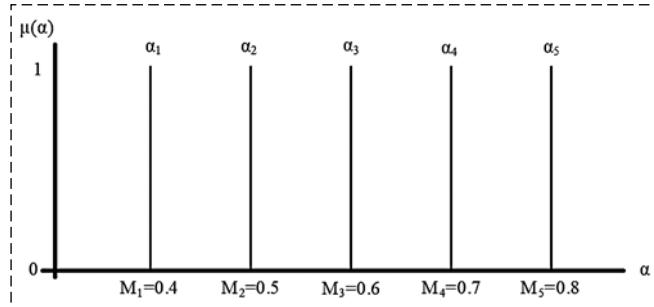


Рис. 5. Выходные функции принадлежности

Fig. 5. Output membership function

**Шаг 1.** Фазификация входной и выходной переменных. Входным параметром НЦФ является переменная, вычисляемая по формуле (2). Далее она преобразуется в лингвистическую переменную с термами  $DX = \{DX_1, DX_2, DX_3, DX_4, DX_5\}$ . Ядром входной лингвистической переменной является диапазон значений от 0,0 до 7,0. График входной функции принадлежности представлен на рис. 4.

Выходной лингвистической переменной является коэффициент регулирования  $\alpha$ , состоящий из пяти термов:  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$ , который задается пропорциональным значением в диапазоне от 40 % до 80 % [0,4; 0,8] от своего максимального значения. График выходной функции принадлежности представлен на рис. 5.

**Шаг 2.** Определение степеней функций принадлежности для входной переменной в зависимости от разницы текущего и предыдущего сигналов с выхода ПИД регулятора, вычисленной по формуле

$$\begin{aligned} DX_1 &= \begin{cases} 1, & \text{если } DX \in [0; 1, 2], \\ \frac{2,4 - DX}{1,2}, & \text{если } DX \in (1, 2; 2, 4], \\ 0, & \text{если } DX \in [2, 4; 7, 0]. \end{cases} \\ DX_2 &= \begin{cases} 0, & \text{если } DX \in [0; 1, 2], \\ \frac{DX - 1,2}{1,2}, & \text{если } DX \in (1, 2; 2, 4], \\ \frac{3,6 - DX}{1,2}, & \text{если } DX \in (2, 4; 3, 6], \\ 0, & \text{если } DX \in [3, 6; 7, 0]. \end{cases} \\ DX_3 &= \begin{cases} 0, & \text{если } DX \in [0; 2, 4], \\ \frac{DX - 2,4}{1,2}, & \text{если } DX \in (2, 4; 3, 6], \\ \frac{4,8 - DX}{1,2}, & \text{если } DX \in (3, 6; 4, 8], \\ 0, & \text{если } DX \in [4, 8; 7, 0]. \end{cases} \quad (7) \\ DX_4 &= \begin{cases} 0, & \text{если } DX \in [0; 1, 2], \\ \frac{DX - 1,2}{1,2}, & \text{если } DX \in (1, 2; 2, 4], \\ \frac{3,6 - DX}{1,2}, & \text{если } DX \in [2, 4; 3, 6], \\ 0, & \text{если } DX \in [6, 0; 7, 0]. \end{cases} \\ DX_5 &= \begin{cases} 0, & \text{если } DX \in [0; 4, 8], \\ \frac{DX - 4,8}{1,2}, & \text{если } DX \in (4, 8; 6, 0], \\ 1, & \text{если } DX \in [6, 0; 7, 0]. \end{cases} \end{aligned}$$

Псевдокод вычисления степеней функций принадлежности представлен в Листинге 2.

## Листинг 2. Процедура вычисления степеней функций принадлежности

Procedure Fuzzy\_set(DX, Lim1, Lim2, Lim3)

**Input:** DX — input value, calculated by formula (2)

Lim1 — First limit of the membership function,  
Lim2 — Second limit of the membership function;  
Lim3 — Third limit of the membership function;

**Output:** DXr — Fuzzy inference; where r = 1...5 is number degrees of the membership function

Begin

Case (r = 1) Lim2 = 1.2 And Lim3 = 2.4 (r = 1)

if (DX < Lim2) {DX1 = 1};  
if (DX > Lim2) And (DX < Lim3)  
{DXr = Lim3 - DX/1.2};  
if (DX > Lim3) {DXr = 0};

Case (r = 5) Lim1 = 4.8 And Lim2 = 6.0 (r = 5)

if (DX < Lim1) {DXr = 0};  
if (DX > Lim1) And (DX < Lim2)  
{DXr = DX - Lim1/1.2};  
if (DX > Lim2) {DXr = 1};

Case 3 (r = 2, 3, 4){Lim1 = 1.2,

Lim2 = 2.4 And Lim3 = 3.6 for r = 2}  
{Lim1 = 2.4, Lim2 = 3.6  
And Lim3 = 4.8 for r = 3}  
{Lim1 = 3.6, Lim2 = 4.8  
And Lim3 = 6.0 for r = 4}  
if (DX < Lim1 || DX > Lim3) {DXr = 0};  
if (DX > Lim1) And  
(DX < Lim2) {DXr = DX - Lim1/1.2};  
if (DX > Lim2) And (DX < Lim3)  
{DXr = Lim3 - DX /1.2};

Return DXr;

End

**Шаг 3.** Синтез базы знаний, которая состоит из пяти нечетких правил "Если ... То". Определение степеней принадлежности каждой предпосылки нечеткого правила осуществляется на основе данных, вычисленных по формуле (7):

FuzzyRule 1: "Если  $DX = DX_1$  То  $M = M_1$ "

FuzzyRule 2: "Если  $DX = DX_2$  То  $M = M_2$ "

FuzzyRule 3: "Если  $DX = DX_3$  То  $M = M_3$ " (8)

FuzzyRule 4: "Если  $DX = DX_4$  То  $M = M_4$ "

FuzzyRule 5: "Если  $DX = DX_5$  То  $M = M_5$ "

**Шаг 4.** Дефазификация на основе метода отношения площадей. Определение выходного значения с НЦФ осуществляется с помощью псевдокода, представленного в Листинге 3 [17, 18].

## Листинг 3. Псевдокод для вычисления результирующего значения НЦФ

Procedure Power\_Fuzzy\_Filter(output, last\_output)

**Inputs:** output — PID controller output value,  
last\_output — saved value of PID controller output from the last reading,

**Output:** new\_output — filtered signal for the MOSFET transistor;

Begin

DX = output - last\_output;  
DX1, DX2, DX3, DX4, DX5 =  
Fuzzy\_set(DX, Lim1, Lim2, Lim3);  
alpha = ((DX1 + DX2 + DX3 + DX4 +  
DX5)/5)\*0.4; + 0.4;  
beta = 1 - alpha;  
new\_output = (last\_output\*alpha) + (output\*beta);  
last\_output = output;  
Return new\_output;

End

## Экспериментальное исследование

Характеристики системы управления ТЭ с помощью предложенной структуры НЦФПИД регулятора были определены путем проведения экспериментальных исследований. Экспериментальная установка системы управления с программно-реализованными НЦФПИД и ПИД регуляторами показана на рис. 6.

Суть эксперимента заключалась в проверке реакции системы управления ТЭ на изменение установленного значения температуры с  $T_{setpoint1} = 15^{\circ}\text{C}$  (рис. 7, а, линия 1) на  $T_{setpoint2} = 35^{\circ}\text{C}$  и в оценке времени регулировки, необходимого для достижения заданного значения температуры. В течении эксперимента осуществлялось сравнение работы разработанной модели НЦФПИД регулятора (рис. 7, а, в) и ПИД регулятора (рис. 7, б, г). В целях обеспечения достоверности были проведены 100 экспериментов. На рис. 7 представлены две реализации эксперимента с минимальным и максималь-

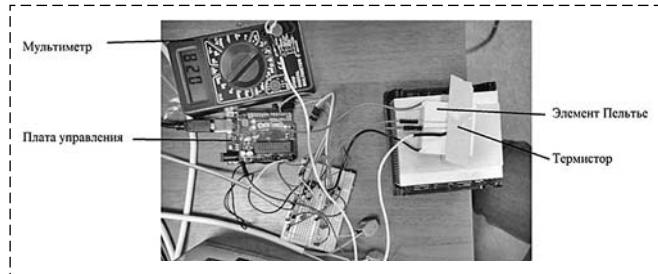
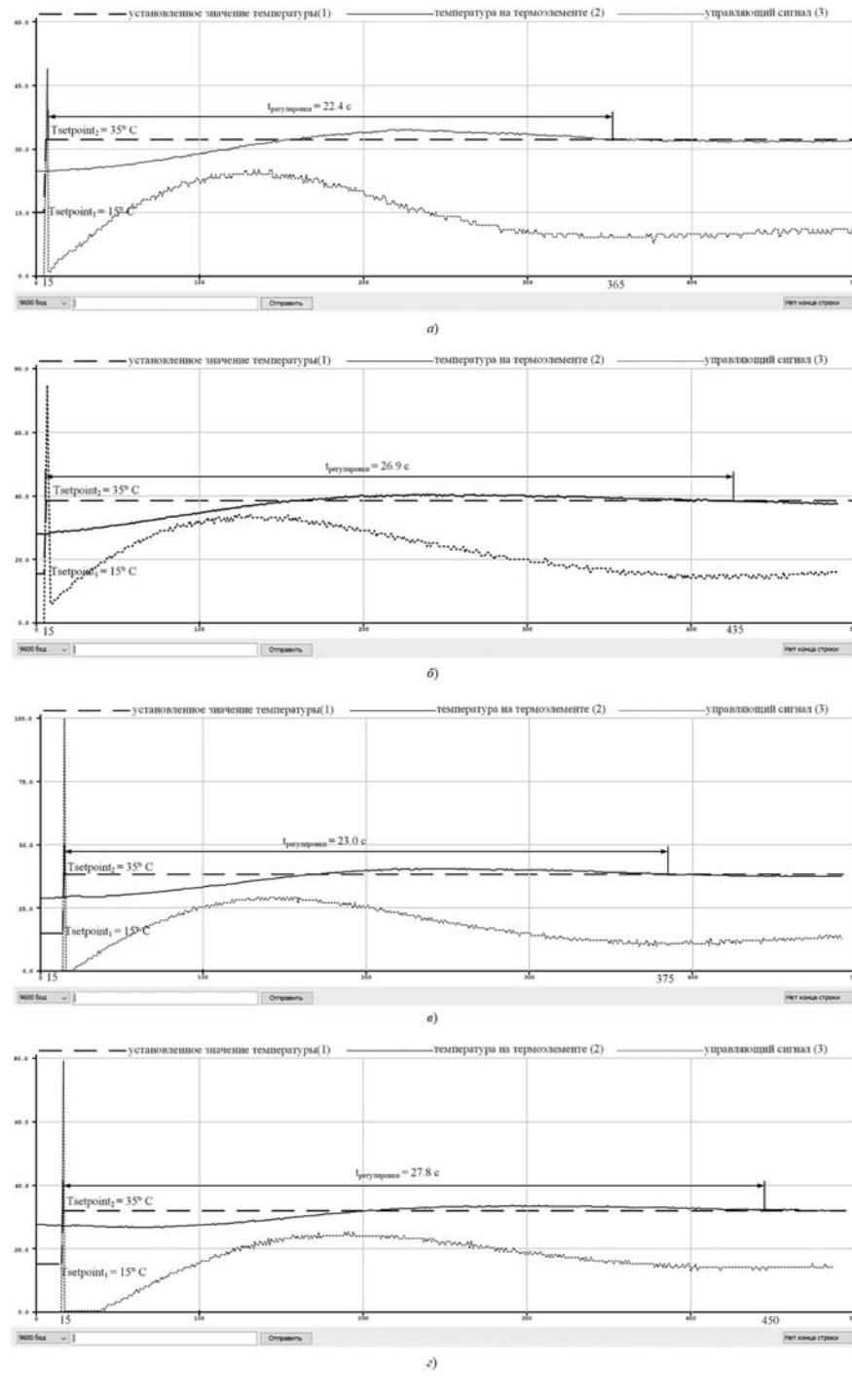


Рис. 6. Экспериментальная установка СУТ с НЦФПИД  
Fig. 6. Experimental device for the thermoelement control system with FDFPID



**Рис. 7. Моделирование работы системы управления термоэлементом:**

*a* — переходный процесс в СУТ с НЦФПИД регулятором (минимальное время); *б* — переходный процесс в СУТ с ПИД регулятором (минимальное время); *в* — переходный процесс в СУТ с НЦФПИД регулятором (максимальное время); *г* — переходный процесс в СУТ с ПИД регулятором (максимальное время)

**Fig. 7. Simulation of the thermoelement control system:**

*a* — transient process in the thermoelement control system with FDFPID controller (minimum time); *b* — transient process in the thermoelement control system with PID controller (minimum time); *c* — transient process in the thermoelement control system with FDFPID controller (maximum time); *d* — transient process in the thermoelement control system with PID controller (maximum time)

ным показателями времени регулирования для предложенного в статье НЦФПИД регулятора и ПИД регулятора. Экспериментальные характеристики были получены в среде Arduino Uno с помощью программного "Плоттера по последовательному соединению". На его экран выводятся три линии тренда (см. рис. 7 и **Листинг 1**): линия 1 — заданная температура ( $T_{setpoint}$ ); линия 2 — температура на ТЭ ( $T_{input}$ ); линия 3 — управляющий сигнал ( $power_{map}$ ).

Следует отметить, что программная модель плоттера по последовательному соединению (рис. 7, ось абсцисс) в микропроцессоре Arduino Uno выводит значения каждые 640 мс, это значит, что 100 показаний плоттера соответствуют 6,4 с. Таким образом время регулировки для эксперимента, представленного на рис. 7, *a*, вычисляется по формуле

$$6,4(t_1 - t_2)/100.$$

В нашем случае время регулировки составит  $6,4 \cdot (365 - 150)/100 = 22,4$  с.

Во время эксперимента посредством ввода данных через СОМ-порт платы управления изменялась температура с 15 до 35 °C. Данный скачок значений температур отражен на 15-м измерении (значение по оси X), что соответствует 1 с от начала запуска системы управления ТЭ (рис. 7, линия 1). После изменения заданного значения температуры НЦФПИД регулятор (рис. 7, *a*, *в*) или ПИД регулятор (рис. 7, *b*, *г*) начинают процесс управления, в связи с этим происходит скачок сигнала управления ТЭ (сигнал 3 на 15-м отсчете по оси X, рис. 7). В целях ограничения

ничения данного скачка в программной модели была введена формула (4), благодаря которой управляемый сигнала может изменяться в диапазоне от 0 до 100 единиц.

Представленные графики показывают, что при использовании НЦФПИД регулятора среднее время процесса регулирования переходного процесса составляет 22,7 с. Среднее время процесса регулирования переходного процесса при использовании ПИД регулятора составляет 27,35 с. Следовательно, при использовании предложенного в статье регулятора время регулирования переходного процесса сокращается в среднем на 19 %.

## Заключение

В данной статье рассмотрена система управления ТЭ, предназначенная для повышения эффективности работы системы охлаждения. При анализе экспериментальных данных установлено, что при использовании предложенной в статье аппаратно-программной модели НЦФ и ПИД регулятора время регулирования переходным процессом сокращается в среднем на 19 %. Также подтвердилась гипотеза о том, что при совместном использовании НЦФ и ПИД регулятора упрощается настройка его параметров регулирования.

## Список литературы

1. Надеждин И. С., Горюнов А. Г., Флавио М. Системы управления нестационарным объектом на основе МРС-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой // Управление большими системами: сборник трудов. 2018. № 75. С. 50–75.
2. Белов М. П., Чыонг Д. Д. Синтез ПИД-регулятора самонастраивающейся нелинейной системы управления электропривода экзоскелета с помощью нейронной сети // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 3. С. 55–64.
3. Alkargole H. M., Hassan A. S., Hussein R. T. Analyze and Evaluate the Performance Velocity Control in DC Motor //
4. Баранов О. В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 10. С. 829–838.
5. Nayak J. R. et al. Application of optimized adaptive crow search algorithm based two degree of freedom optimal fuzzy PID controller for AGC system // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2022. Т. 32. С. 101061.
6. Sain D., Mohan B. M. Simulation and real-time implementation of a nonlinear fuzzy PI/PD controller // IFAC-PaperOnLine. 2020. Т. 53, № 1. С. 673–678.
7. Кудинов Ю. И., Келина А. Ю. Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД регуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 12–22.
8. Zhusubaliyev Z. T., Medvedev A., Silva M. M. Bifurcation analysis of PID-controlled neuromuscular blockade in closed-loop anesthesia // Journal of Process Control. 2015. Т. 25. С. 152–163.
9. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С. Автоменная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 8. С. 469–473.
10. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С. Автоменная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть II // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 8. С. 558–563.
11. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Р. 108449.
12. Бобырь М. В. и др. Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, № 1. С. 115–129.
13. Куммингс Л., Русских М. Использование нестандартных термисторов с семейством преобразователей температуры в цифровой код // Компоненты и технологии. 2021. № 5. С. 17–22.
14. Arduino Documentation: Language Reference [Электронный ресурс]: Сведения о математической функций Map. URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/math/map/>
15. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnukh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 152. 2020. 107378.
16. Ушкин И. С., Шумилкин А. А., Адилов Р. М. Использование ПИД-регуляторов в системах автоматического управления // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 226–226.
17. Бобырь М. В., Лунева М. Ю., Ноливос К. А. Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMin // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 4. С. 244–250.
18. Bobyr M. V., Titov V. S., Belyaev A. Fuzzy system of distribution of braking forces on the engines of a mobile robot. MATEC Web Conf. 79, 2016. 01052.

## PID Regulator and Fuzzy-Digital Filter Combination in the Thermoelement Control Task

M. V. Bobyr, maxbobyr@gmail.com, N. A. Milostnaya, nat\_mil@mail.ru, C. A. Nolivos, cris\_93\_bep@hotmail.com  
South West State University, Kursk, 305040, Russian Federation,

Corresponding author: Bobyr Maksim V., Doctor of Science, Professor, South West State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: maxbobyr@gmail.com

Accepted on May 18, 2022

## Abstract

The thermoelement control system basis on the fuzzy logic has been developed in this article. This system improves the stability characteristics of devices using a PID controller in their structure. This effect is achieved by reducing the output signal, the value of which is calculated using a fuzzy digital filter. The main aspect of the fuzzy digital filter is the use of the area ratio method during defuzzifying. The limitation of this method is the use of triangular membership functions. The experimental results presented in the article demonstrate the effectiveness of the proposed solution. The study has shown that the time of transient processes with the combined control of the thermoelement is reduced by 16–22 %.

**Keywords:** thermoelement, cooling system, PID controller, fuzzy logic, fuzzy digital filter, area ratio method

For citation:

**Bobyrs M. V., Milostnaya N. A., Nolivos C. A.** PID Regulator and Fuzzy-Digital Filter Combination in a Thermoelement Control Task, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 9, pp. 473–480.

DOI: 10.17587/mau.23.473-480

## References

1. Nadezhdin I. S., Gorjunov A. G., Flavio M. Control systems for a non-stationary object based on MPC controller and PID controller with fuzzy logic, *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*, 2018, no. 75, pp. 50–75 (in Russian).
2. Belov M. P., Chyong D. D. Synthesis of a PID controller of a self-adjusting nonlinear exoskeleton electric drive control system using a neural network, *Izvestija SPBGETU LETI*, 2021, no. 3, pp. 55–64 (in Russian).
3. Alkargole H. M., Hassan A. S., Hussein R. T. Analyze and Evaluate the Performance Velocity Control in DC Motor, *Radioelektronika. Nanosistemy. Informacionnye tehnologii.*, 2020, vol. 12, no. 4. pp. 507–516.
4. Baranov O. V. Algorithm for setting the stabilizing PID controller of the quadcopter, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Prirodstroenie*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 829–838 (in Russian).
5. Najak J. R. et al. Application of optimized adaptive crow search algorithm based two degrees of freedom optimal fuzzy PID controller for AGC system, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, vol. 32, pp. 101061.
6. Sain D., Mohan B. M. Simulation and real-time implementation of a nonlinear fuzzy PI/PD controller, *IFAC-PapersOn-Line*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 673–678.
7. Kudinov Ju. I., Kelina A. Ju. Simplified method for determining the parameters of fuzzy PID controllers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 1, pp. 12–22 (in Russian).
8. Zhushubaliyev Z. T., Medvedev A., Silva M. M. Bifurcation analysis of PID-controlled neuromuscular blockade in closed-loop anesthesia, *Journal of Process Control*, 2015, vol. 25, pp. 152–163.
9. Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Jakushev A. S. Autonomous cutting tool cooling system in a CNC machine control task. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 8, pp. 469–473 (in Russian).
10. Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Jakushev A. S. Autonomous cutting tool cooling system in a CNC machine control task. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 8, pp. 558–563 (in Russian).
11. Bobyr M. V., Milostnaja N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio, *Applied Soft Computing*, 2022, pp. 108449 (in Russian).
12. Bobyr M. V. et. al. Investigation of fuzzy digital filter device for robot manipulator, *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 115–129 (in Russian).
13. Cummings L., Russikh M. Using non-standard thermistors with a family of temperature-to-digital converters, *Komponenty i tehnologii*, 2021, no. 5, pp. 17–22 (in Russian).
14. Arduino Documentation: Language Reference: Description about the map function URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/math/map/>
15. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnukh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2020, vol. 152, pp. 107378.
16. Ushkin I. S., Shumilkin A. A., Adilov R. M. Using PID controllers in automatic control systems, *Uspehi sovremennoego estestvoznanija*, 2011, no. 7, pp. 226–226.
17. Bobyr' M. V., Luneva M. Ju., Nolivos K. A. Fuzzy digital filter to control the ARMin robotic arm, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 244–250 (in Russian).
18. Bobyr M. V., Titov V. S., Belyaev A. Fuzzy system of distribution of braking forces on the engines of a mobile robot, *MATEC Web Conf*, 2016, vol. 79, pp. 1052.