

5. А. с. (СССР) № 1444892, G11C17/00, GO6F7/00. Программируемое логическое устройство / С. Ф. Тюрин, В. С. Харченко, С. Н. Ткаченко В. Я., Жихарев, В. П. Улитенко. Оpubл. БИ № 46, 1988.

6. Тюрин С. Ф. Проблема сохранения функциональной полноты булевых функций при «отказах» аргументов // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 9. – С. 176–186.

7. Tyurin S., Kharchenko V. Redundant Bases for Critical Systems and Infrastructures: General Approach and Variants of Implementation Proceedings of the 1st International Workshop on Critical Infrastructures Safety and Security, Kirovograd, Ukraine 11–13, May, 2011 / Tyurin S., Kharchenko V., Tagarev V. (edits). – Vol. 2. – P. 300–307.

S. F. Tyurin, DSc in Engineering, Perm National Research Polytechnic University

A. M. Morozov, Student, Perm National Research Polytechnic University

I. S. Ponurovskiy, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

Development of Logical PLD-FPGA Element for DNF Implementation

Authors suggest and analyze logical element of FPGA-programmable logical device as part of a configurable logic block. Generally, logical element implements logical functions in DNF, however, with the growth of variables number the complexity of such implementation increases sharply. The suggested logical element decreases the cost of logical functions' implementation.

Key words: field programmable logical device, logical element, configurable logic block, principal disjunctive normal form, disjunctive normal form.

УДК 621.317.7

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

К. А. Никитин, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Представлена схема и принцип работы термостата с ПИД-регулированием температуры источника теплового потока, результаты совместного моделирования электрической схемы термостата, логической схемы ПИД-регулятора и тепловой схемы нагревателя.

Ключевые слова: источник теплового потока, термостат, ПИД-регулятор, датчик-нагреватель, моделирование.

Источник теплового потока (ИТП) предназначен для градуировки и исследования метрологических характеристик датчиков плотности теплового потока погружаемого типа [1]. Подобные источники промышленностью не производятся, так как до настоящего времени отсутствовала потребность в них.

В состав ИТП (рис. 1) входят: сосуд Дьюара 1, в который помещены нагревательный элемент 2, задающий требуемую плотность теплового потока q , грунт 3 и выполненный в виде пластины стабилизатор температуры (СТ) 4 [2]. Для снижения теплопотерь в радиальном направлении используются четыре дополнительных кольцевых СТ 5, создающих на боковой стенке сосуда Дьюара градиент температуры, равный градиенту в объеме грунта.

Как показали исследования, для обеспечения высокой стабильности теплового потока, создаваемого в пространстве грунта между нагревательным элементом 2 и СТ 4, необходимо с высокой точностью обеспечивать постоянство температуры на пластине стабилизатора и градиента температуры на боковой стенке сосуда Дьюара. При этом внешние грани СТ подвергаются переменным во времени воздействиям температуры окружающей среды. Причем изменяет-

ся как сама температура среды, так и коэффициент теплоотдачи от СТ в среду.

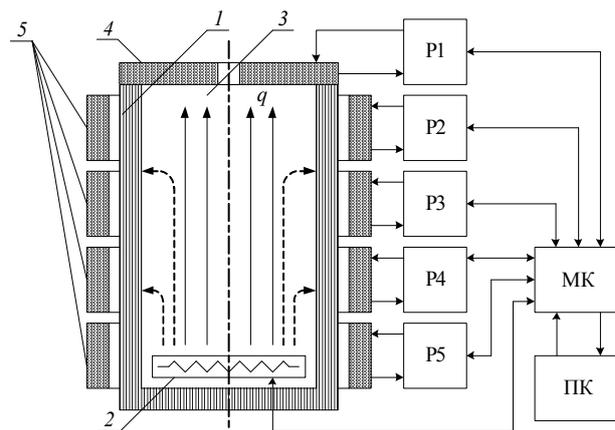


Рис. 1. Структурная схема лабораторного источника теплового потока: 1 – сосуд Дьюара; 2 – нагреватель; 3 – грунт; 4, 5 – стабилизаторы температуры; P1–P5 – регуляторы температуры; МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер

Стабилизатор температуры выполнен в виде медного термопреобразователя сопротивления (ТПС),

совмещающего функции нагревателя и датчика температуры (ДН). Это обеспечивает равенство нулю времени транспортной задержки системы регулирования, что упрощает проектирование и ее расчет.

В схемах управления всех СТ используются унифицированные блоки (рис. 2).

Регулятор температуры состоит из промежуточного преобразователя (ПП), цифроаналогового преобразователя (ЦАП), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микроконтроллера (МК) и ПИД-регулятора, алгоритм функционирования которого реализован в виде программы на ПК.

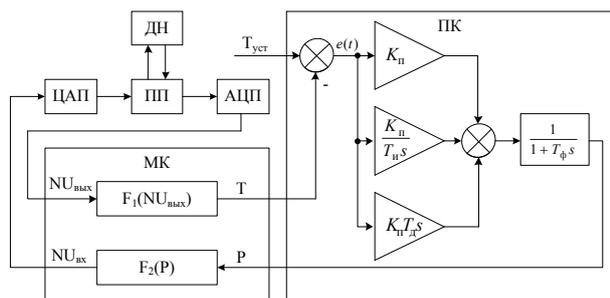


Рис. 2. Функциональная схема регулятора температуры

Промежуточный преобразователь устанавливает ток нагрева (измерительный ток) ДН пропорционально выходному напряжению ЦАП и преобразует сопротивление ДН в эквивалентное ему напряжение.

Сигнал с выхода ПП поступает на вход АЦП. Микроконтроллер преобразует выходной код АЦП $NU_{\text{вых}}$ в код температуры T и передает на вход ПИД-регулятора. Выходным сигналом ПИД-регулятора является код мощности P , значение и знак которой зависят от разности $e(t)$ измеренной и установленной $T_{\text{уст}}$ температур, а также от скорости ее изменения во времени. Отрицательный знак мощности свидетельствует о том, что измеренная температура СТ превышает заданную и необходимо снизить мощность, выделяемую на ДН. Микроконтроллер преобразует выходной сигнал ПИД-регулятора в десятичный входной код ЦАП $NU_{\text{вх}}$ и записывает его, устанавливая новое значение тока нагрева. По завершению переходного процесса ток нагрева ДН фиксируется на некотором уровне, регулятор переходит в режим поддержания температуры.

Основным структурным элементом регулятора, определяющим точность установки и измерения температуры, является ПП, схема которого приведена на рис. 3.

На операционном усилителе (ОУ) DA_1 , транзисторе VT_1 и резисторах R_1, R_2, R_4 собран источник тока, значение которого определяется по формуле

$$I = U_{\text{ЦАП}} \frac{R_4}{R_2 + R_4} \frac{1}{R_1}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ЦАП}}$ – выходное напряжение ЦАП.

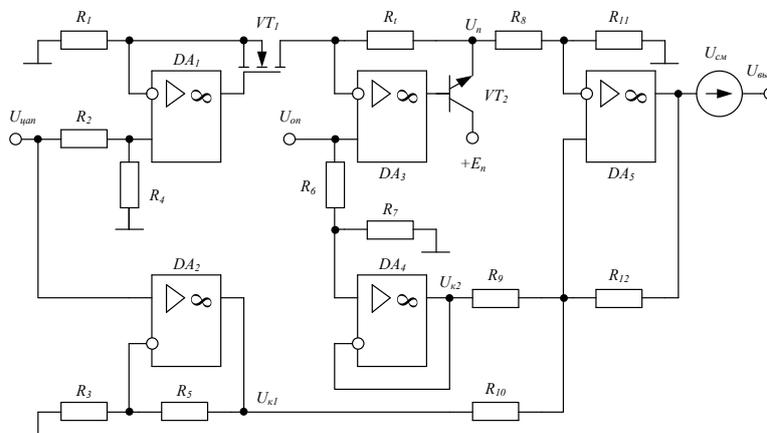


Рис. 3. Промежуточный преобразователь

На ОУ DA_3 и транзисторе VT_2 собран преобразователь «сопротивление – напряжение», выходное напряжение которого можно представить в виде

$$U_{\text{П}} = U_{\text{оп}} + IR_t, \quad (2)$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение; R_t – сопротивление ДН.

На ОУ DA_2, DA_4, DA_5 и резисторах $R_3, R_5 - R_{12}$ выполнен нормирующий усилитель (НУ), усиливающий сигнал с выхода преобразователя «сопро-

тивление – напряжение» до диапазона оцифровки АЦП, а также компенсирующий влияние напряжений $U_{\text{ЦАП}}$ и $U_{\text{оп}}$ на выходной сигнал ПП.

На точность схемы оказывают влияние напряжения смещения нуля всех активных компонентов схемы, которые моделируются источником $U_{\text{см}}$, и разброс значений сопротивлений резисторов в пределах допуска. Для определения собственной погрешности ПП проведено статистическое моделирование по методу Монте – Карло в среде MicroCAP. На рис. 4 приведена гистограмма выходного

напряжения ПП при использовании прецизионных ОУ AD8628, ADA4638-1 и резисторов с допуском 0,1%; разброс напряжений смещения активных

элементов не учитывался. Промежуточный преобразователь рассчитан на работу с ДН номинальным сопротивлением 50 Ом.

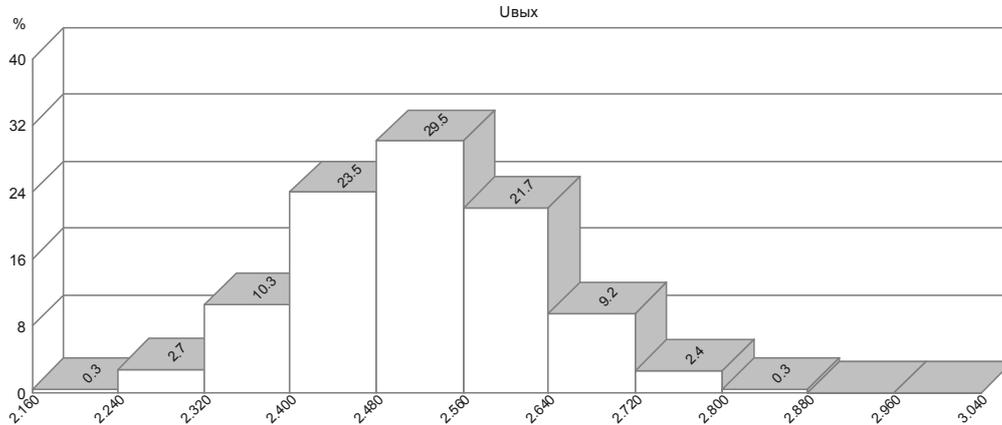


Рис. 4. Гистограмма выходного напряжения промежуточного преобразователя

Как видно, при указанном допуске резисторов максимальная погрешность выходного напряжения составляет:

$$\delta_{\max} = \max \left\{ \frac{U_{\text{ПП,мин}} - U_{\text{ПП,сред}}}{U_{\text{ПП,сред}}}, \frac{U_{\text{ПП,макс}} - U_{\text{ПП,сред}}}{U_{\text{ПП,сред}}} \right\} \times 100\% = 14,4\% \quad (3)$$

где $U_{\text{ПП,мин}} = 2,175$ В, $U_{\text{ПП,сред}} = 2,516$ В, $U_{\text{ПП,макс}} = 2,877$ В – минимальное, среднее и максимальное выходное напряжение ПП соответственно.

Данная погрешность является систематической и может быть скомпенсирована на этапе градуировки системы. Для этого необходимо иметь методику идентификации параметров ПП на основе его математической модели.

Напряжение компенсации $U_{\text{ЦАП}}$ можно представить как

$$U_{\text{к1}} = U_{\text{ЦАП}} \left(1 + \frac{R_5}{R_3} \right) \quad (4)$$

Напряжение компенсации $U_{\text{ОП}}$ рассчитывается по формуле

$$U_{\text{к2}} = U_{\text{ОП}} \frac{R_7}{R_6 + R_7} \quad (5)$$

Выходное напряжение промежуточного преобразователя записывается в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{R_{11}}{R_8 + R_{11}} \left(1 + \frac{R_{12}}{R_9} + \frac{R_{12}}{R_{10}} \right) - U_{\text{к1}} \frac{R_{12}}{R_{10}} - U_{\text{к2}} \frac{R_{12}}{R_9} + U_{\text{см}} \quad (6)$$

Подставляя (1), (2), (4), (5) в выражение (6) и раскрывая скобки, получаем:

$$U_{\text{вых}} = \alpha U_{\text{ЦАП}} R_t + \beta U_{\text{ЦАП}} + \psi, \quad (7)$$

где

$$\alpha = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \frac{1}{R_1} \frac{R_{11}}{R_8 + R_{11}} \left(1 + \frac{R_{12}}{R_9} + \frac{R_{12}}{R_{10}} \right); \quad (8)$$

$$\beta = - \left(1 + \frac{R_5}{R_3} \right) \frac{R_{12}}{R_{10}}; \quad (9)$$

$$\psi = -U_{\text{ОП}} \left(\frac{R_7}{R_6 + R_7} \frac{R_{12}}{R_9} - \frac{R_{11}}{R_8 + R_{11}} \left(1 + \frac{R_{12}}{R_9} + \frac{R_{12}}{R_{10}} \right) \right) + U_{\text{см}} \quad (10)$$

Если α , β и ψ известны, то значение R_t определяется по формуле

$$R_t = \frac{U_{\text{вых}} - \beta U_{\text{ЦАП}} - \psi}{\alpha U_{\text{ЦАП}}} \quad (11)$$

Выражение (7) линейно относительно α , β и ψ , поэтому значения коэффициентов могут быть определены экспериментально через приращения величин:

$$\alpha = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta R_t} \frac{1}{U_{\text{ЦАП}}} \Bigg|_{U_{\text{ЦАП}} = \text{const}}; \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{ЦАП}}} - \alpha R_t \Bigg|_{R_t = \text{const}}; \quad (13)$$

$$\psi = U_{\text{вых}} - \alpha U_{\text{ЦАП}} R_t - \beta U_{\text{ЦАП}} \Bigg|_{U_{\text{ЦАП}} = \text{const}, R_t = \text{const}} \quad (14)$$

Путем моделирования были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha = 0,36039$ 1/Ом, $\beta = 19,8956$, $\gamma = 2 \cdot 10^{-8}$ В.

Выражение (11) с учетом коэффициентов преобразования ЦАП и АЦП может быть использовано в программном обеспечении МК для преобразования выходного кода АЦП в сопротивление ДН.

Точность поддержания температуры в режиме регулирования и скорость затухания переходного процесса зависят от выбора параметров настройки ПИД-регулятора, комплексная частотная характеристика (КЧХ) которого может быть записана в виде

$$R(s) = K_{\pi} \left(1 + \frac{1}{T_{и}s} + T_{д}s \right) \frac{1}{1 + T_{\phi}s}, \quad (15)$$

где s – оператор Лапласа; K_{π} , $T_{и}$, $T_{д}$ – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования ПИД-регулятора соответственно; T_{ϕ} – постоянная времени сглаживающего фильтра.

КЧХ замкнутого контура системы регулирования определяется по формуле

$$\Phi(s) = \frac{W_{\mu}(s)R(s)}{1 + W_{\mu}(s)R(s)}, \quad (16)$$

где $W_{\mu}(s)$ – КЧХ СТ.

КЧХ СТ может быть представлена в виде цепочки двух последовательно включенных аperiodических звеньев без звена запаздывания:

$$W_{\mu}(s) = \frac{K_0}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}, \quad (17)$$

где $K_0 = 10,224$ К/Вт, $T_1 = 745,25$ с, $T_2 = 3,19$ с – аналитические найденные коэффициент передачи и постоянные времени СТ.

По методике, описанной в [3], с использованием выражения (16) получены следующие параметры настройки ПИД-регулятора: $K_{\pi} = 27,674$ Вт/К, $T_{и} = 201,545$ 1/с, $T_{д} = 1,792$ с, $T_{\phi} = 14$ с.

Для проверки работоспособности предложенной схемы регулятора в среде Micro-CAP производилось совместное моделирование тепловой схемы СТ, построенной на основе электротепловой аналогии [4], электрической схемы ПП и алгоритмической схемы ПИД-регулятора. Температура окружающей среды задавалась на уровне 25 °С; регулятор был настроен на поддержание температуры 35 °С.

На рис. 5 представлен график переходного процесса системы регулирования. Здесь $I(R_t)$ – значение тока нагрева ДН; $V(E7)$ – напряжение, численно соответствующее температуре СТ; $V(29)$ – напряжение, численно соответствующее измеренной температуре СТ.

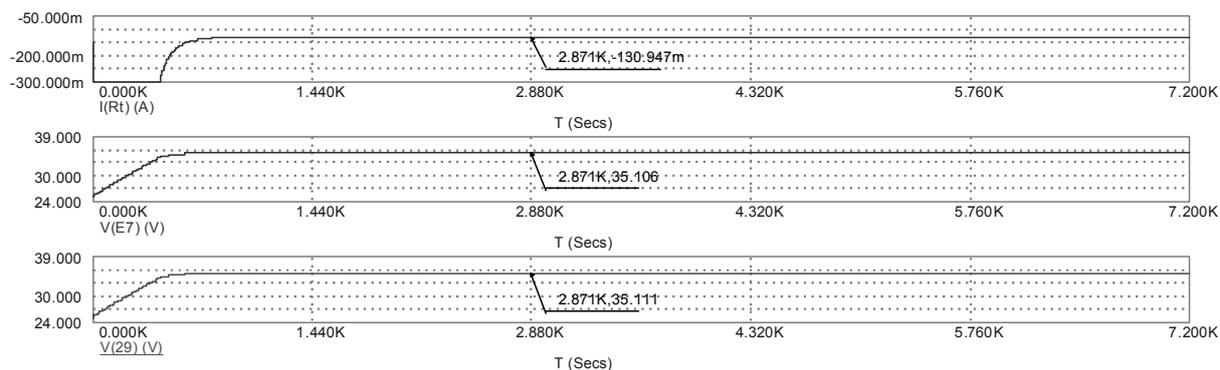


Рис. 5. График переходного процесса системы регулирования

Как видно, в начальный момент времени регулятор находится в режиме насыщения, и через ДН протекает максимальный ток нагрева. Когда температура СТ достигает уровня 0,95 от заданной, значение тока начинает уменьшаться и по завершении переходного процесса фиксируется на некотором уровне. При этом отклонение температуры СТ от заданной не превышает 0,106 К, а погрешность измерения температуры составляет примерно 0,005 К.

Одним из параметров регулятора, определяющим точность поддержания температуры при нестационарных внешних условиях, является коэффициент стабилизации температуры

$$K_T = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{дн}}, \quad (18)$$

где ΔT_c – изменение температуры окружающей среды; $\Delta T_{дн}$ – изменение температуры ДН.

На рис. 6 представлен график переходного процесса системы регулирования при нестационарных внешних условиях. Температура окружающей среды задана на уровне 25 °С, амплитуда колебания – 1 К, период – 3600 с. Регулятор настроен на поддержание температуры 35 °С.

Видно, что при изменении температуры окружающей среды на 2 К изменение температуры ДН составляет 0,073 К. Тогда расчет по формуле (18) дает значение коэффициента стабилизации температуры 27,4 единиц.

Регулятор непрерывно отслеживает температуру ДН и при ее увеличении уменьшает ток нагрева, а при уменьшении температуры – увеличивает ток.

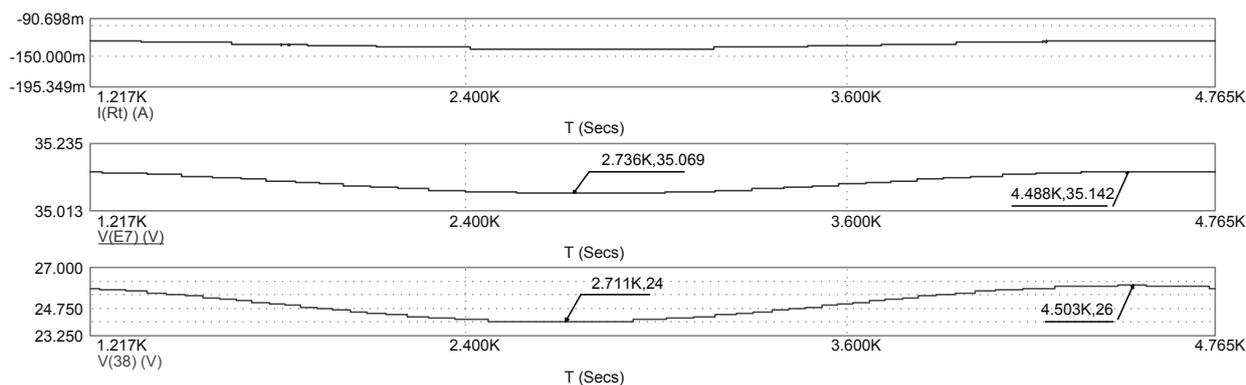


Рис. 6. График переходного процесса при нестационарных внешних условиях

Таким образом, показана возможность использования предложенной схемы регулятора температуры в лабораторном источнике теплового потока. Точность измерения температуры составляет 0,005 К, а коэффициент стабилизации – 27,4. Математическая модель промежуточного преобразователя и методика идентификации его параметров могут быть использованы в программном обеспечении регулятора для градуировки и преобразования выходного кода АЦП в сопротивление ДН. Полученные в процессе моделирования данные могут быть использованы для дальнейшей оптимизации параметров настройки ПИД-регулятора.

Библиографические ссылки

1. Куликов В. А., Никитин К. А. Исследование градиентного датчика малых тепловых потоков в грунте // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 186–192.
2. Nikitin K. A. Investigations of laboratory heat-flux source // Third forum of young researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2012”. – Izhevsk : ISTU, 2012. – P. 176–180.
3. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М. : Энергия, 1974. – 416 с.
4. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. – М. : Изд. дом «МЭИ», 2008. – 396 с.

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

K. A. Nikitin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Modeling of Temperature PID-Regulator for Heat-Flux Source

The scheme and principle of operation of the thermostat with temperature PID-regulator, results of co-simulation of electrical scheme of the thermostat, logical scheme of PID-regulator and heat scheme of the laboratory heat-flux source and results of experimental studies are presented in this article.

Key words: heat-flux source, thermostat, PID-regulator, sensor-heating, modeling.