

УДК 681.5

## ПЕРЕХОД ОТ АНАЛОГОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА К ЦИФРОВОЙ\*

А.Б. КОЛКЕР<sup>1</sup>, Ф.В. ШАМАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: a.kolker@corp.nstu.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры автоматике. E-mail: fedia\_8@mail.ru

В данной статье подробно описывается подход к преобразованию аналоговой реализации регулятора в аналогичную по своим характеристикам цифровую форму. Основной задачей является преобразование закона управления аналоговой схемы в программный код на языке программирования Си. В качестве исходного представления аналоговой формы регулятора берется электрическая принципиальная схема, по которой с помощью операторных замещений идентифицируется математическая модель, которая представляется в виде передаточной функции. Далее полученная передаточная функция посредством  $Z$ -преобразования переводится в дискретное представление, рекуррентную форму которого возможно реализовать в виде текста программы для последующего выполнения на микроконтроллере. При вычислении дискретной передаточной функции необходимым является учет эмпирически найденного времени выполнения получившейся программы на микроконтроллере. Также важной задачей является нахождение коэффициента передачи программной части регулятора, который вычисляется на основе коэффициента передачи, предшествующей микроконтроллеру. При вычислении коэффициента передачи программной части регулятора также учитывается разрядность и диапазон входного напряжения для аналого-цифрового преобразователя и разрядность выходного регистра, отвечающего за скважность сигнала широтно-импульсной модуляции, поступающего с выхода микроконтроллера. Также для вычисления коэффициента немаловажным является величина ограничения управляющего воздействия для каждой реализации регулятора. Как показал промежуточный эксперимент, необходимо вводить программные нелинейности, такие как ограничение на величину внутреннего состояния программного регулятора и величину, при превышении которой значением внутренней переменной, соответствующей «сигналу» управления, длительность импульса сигнала широтно-импульсной модуляции становится максимальной. Согласно

---

\* Статья получена 19 марта 2015 г.

результатам последнего эксперимента получившийся регулятор в достаточной степени обеспечивает требуемые параметры системы.

**Ключевые слова:** регулятор, микроконтроллер TMS320F240, передаточная функция, разностное уравнение, Z-преобразование, аналоговая реализация регулятора, программная реализация регулятора, язык программирования Си

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-18-29

## ВВЕДЕНИЕ

В современных системах автоматического управления аналоговые схемы применяются все реже, как следствие, весьма актуальной остается задача цифровой реализации традиционных аналоговых модулей и схем. Задача данной работы формулируется как переход от принципиальной схемы аналогового регулятора к программной реализации цифрового регулятора.

Для управления двигателем системы стабилизации используется ПИ-регулятор, реализованный на операционных усилителях. Согласно ТЗ, часть выполнения которого изложена в этой статье, требуется реализовать аналогичный регулятор на микроконтроллере TMS320F240. Для этого требуется получить математическую модель имеющегося регулятора, перевести ее в дискретное представление и реализовать с учетом новых коэффициентов передачи схемы и быстродействия микроконтроллера на языке программирования Си.

## 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНАЛОГОВОГО РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим электрическую принципиальную схему, изображенную на рис. 1. На ней представлен регулятор, реализованный на операционных усилителях (ОУ) DA3, DA6. На вход его поступают сигналы с датчика наклона и тахогенератора. Поскольку у ОУ DA3 отсутствуют конденсаторы в обвязке, то его можно заменить просто коэффициентом передачи. При закрытых транзисторах DA1.1 получается эквивалентная схема рис. 2, а; при открытых транзисторах – эквивалентная схема рис. 2, б; коэффициенты передачи 4,3562 и 3,92 соответственно, берется среднее – 4,14.

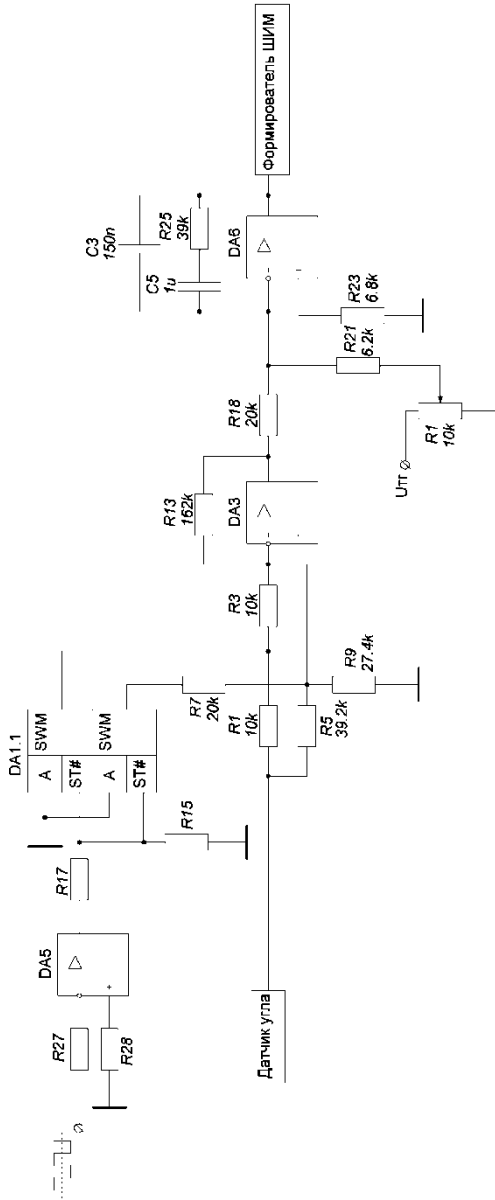


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема аналогового регулятора

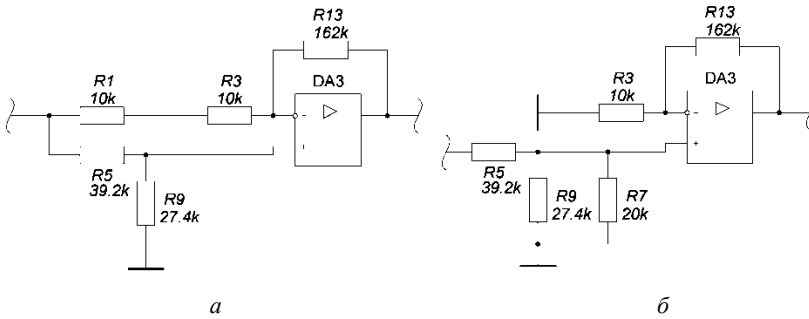


Рис. 2. Эквивалентные схемы:  
а – DA1.1 закрыт; б – DA1.1 открыт

Рассмотрим ОУ DA6, у него в обратной связи имеются конденсаторы, он суммирует сигналы с датчика наклона и тахогенератора. Составляется операционное выражение [1]  $Z_{oc}(p)$  для обратной связи:

$$\begin{aligned}
 Z_{oc}(p) &= \frac{1}{pC_3} \parallel \left( R_{25} + \frac{1}{pC_5} \right) = \frac{1}{pC_3} \left( R_{25} + \frac{1}{pC_5} \right) = \\
 &= \frac{\frac{R_{25}}{pC_3} + \frac{1}{p^2 C_3 C_5}}{\frac{1}{pC_3} + R_{25} + \frac{1}{pC_5}} = \frac{\frac{R_{25} p C_5 + 1}{p^2 C_3 C_5}}{\frac{p C_5 + p C_3 + R_{25} p^2 C_3 C_5}{p^2 C_3 C_5}} = \frac{R_{25} p C_5 + 1}{p C_5 + p C_3 + R_{25} p^2 C_3 C_5} = \\
 &= \frac{R_{25} p C_5 + 1}{p(R_{25} p C_3 C_5 + (C_5 + C_3))} = \frac{R_{25} p C_5 + 1}{p \left( \frac{R_{25} p C_3 C_5}{C_5 + C_3} + 1 \right)} \frac{1}{C_5 + C_3}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Составляется передаточная функция этого ОУ с учетом резисторов обвязки:

$$U(p) = -U_{DA3} \frac{Z_{oc}(p)}{R_{18}} - U_{\text{тг}} \frac{Z_{oc}(p)}{R_{21}} = -Z_{oc}(p) \left( \frac{U_{DA3}}{R_{18}} + \frac{U_{\text{тг}}}{R_{21}} \right), \quad (2)$$

где  $U_{\text{тг}}$  – напряжение тахогенератора.

Подставляются номиналы резисторов и конденсаторов:

$$U(p) = -\frac{0.039p+1}{p(0.005086957p+1)}(43.4783U_{DA3} + 140.2524U_{TT}). \quad (3)$$

Учитывается ОУ DA3, он влияет на коэффициент перед  $U_{DA3}$  в (3), в итоге получается передаточная функция аналогового регулятора:

$$U_{reg}(p) = -\frac{0.039p+1}{p(0.005086957p+1)}(180U_{DA3} + 140.2524U_{TT}) \quad (4)$$

Как показало изучение реальной платы регулятора «Формирователь ШИМ», показанной на рис. 1, он вырабатывает полностью заполненный импульсом период ШИМ при сигнале в 1 В с DA6. У всех ОУ имеется питание  $\pm 15$  В, поэтому сигнал управления на DA6 не может быть больше 15 В. Данная информация, как оказалось, является необходимой для вычисления результирующего коэффициента передачи системы и ограничения накопления интегратором ПИ-регулятора при программной реализации, о чем уже, независимо от данной работы, говорилось в [2–7].

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО РЕГУЛЯТОРА

Для воспроизведения передаточной функции (4) на контроллере необходимо перейти к разностному уравнению. Для этого используется  $Z$ -преобразование [1], после которого получается

$$U_{regZ}(z) = -\frac{B_1z+B_0}{z^2+A_1z+A_0}(180U_{DA3} + 140.2524U_{TT}), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} B_1 &= 0.05735, \\ B_0 &= -0.00562, \\ A_1 &= -1.8545, \\ A_0 &= 0.8545. \end{aligned}$$

Значения этих коэффициентов были получены после программной реализации и выяснения того, что контроллер выполняет получившийся код менее чем за 800 мкс, что и было принято периодом дискретизации.

Из дискретной передаточной функции (5) получаем разностное уравнение, в котором отражены только инерционно-интегрирующие составляющие:

$$\begin{aligned} u(k+2) + A_1 u(k+1) + A_0 u(k) &= B_1 v(k+1) + B_0 v(k), \\ u(k) &= -A_1 u(k-1) - A_0 u(k-2) + B_1 v(k-1) + B_0 v(k-2). \end{aligned} \quad (6)$$

Для вычисления коэффициентов передачи по  $U_{DАЗ}$  и  $U_{ТГ}$  из новой схемы с контроллером берутся коэффициенты усиления преобразующих цепочек ОУ: датчика угла (он равен 20) и тахогенератора (он равен 2). АЦП, на который поступают обработанные сигналы, имеет разрядность 10 [8] и преобразует в код напряжения от 0 до 5 В, из этого коэффициент передачи АЦП равен

$$K_{АЦП} = \frac{2^{10}}{5} = 204.8 \text{ отсчета АЦП / вольт.}$$

Для нахождения программных коэффициентов передачи сигналов датчика угла и тахогенератора составлена пропорция (7):

$$\begin{aligned} 180 &\Leftrightarrow 1 \\ 20 \cdot 204.8 \cdot K_{P_{угл}} &\Leftrightarrow 1248, \end{aligned} \quad (7)$$

где 1248 – значение регистра, отвечающего за скважность ШИМ сигнала и соответствующее максимальной заполненности ШИМ. Откуда программный коэффициент передачи по сигналу датчика угла равен

$$K_{P_{угл}} = 54.8437.$$

Коэффициент передачи по сигналу тахогенератора берется из соотношения коэффициентов передачи сигналов тахогенератора и датчика угла из (4):

$$\begin{aligned} 180 &\Leftrightarrow 140.2524 \\ 20 \cdot 204.8 \cdot 54.8437 &\Leftrightarrow 2 \cdot 204.8 K_{P_{ТГ}}, \end{aligned} \quad (8)$$

откуда

$$K_{P_{ТГ}} = 427.3311.$$

Для вычисления ограничения на максимальное значение программного регулятора (как показала практика, если не ввести данное ограничение, то регулятор может накапливать до огромных величин ограниченных диапазоном переменных типа *float*, что, в свою очередь, при отладке регулятора может привести к механическим повреждениям частей системы): из реализации аналогового регулятора берется величина сигнала, соответствующая максимальному ШИМ (это 1 В) и величина максимального сигнала в регуляторе, она ограничена 15 В питания ОУ. Составляется пропорция (9), для которой берется значение регистра, отвечающего за скажность ШИМ сигнала и соответствующее максимальной заполненности ШИМ 1248:

$$\begin{aligned} 15 &\Leftrightarrow 1 \\ ? &\Leftrightarrow 1248, \end{aligned} \quad (9)$$

откуда максимальное значение, которое могут принимать переменные программной реализации регулятора, равно 18720.

Все вышеизложенное совместно с [8–10] позволяет написать программный код на языке Си для реализации закона управления аналогового регулятора. Далее представлен фрагмент кода, в котором опущены не существенные для закона управления и специфичные для работы данного микроконтроллера действия:

```
float f_znach_pop_inp[3], f_pop_upr[3]; //Значения входного
(угол + скорость) и выходного воздействий на регулятор,
//на (K)-й итерации, (K-1)-й итерации и (K-2)-й
итерации (вх/вых сигналов указан по отношению к регулятору)
void Controlling_Pop(void) // Канал Поперечный
{
    Uint16 Znach_Reg_PWM; //Переменная, для
вывода управления в регистр PWM
    //Вычисление закона управления (ПИ регулятор)
    f_znach_pop_inp[0] =
f_znach_pop*54.8437+f_speed_pop*427.3311; //угол + скорость, с
учетом ООС (отрицат. обрат. связи)
    //Ограничение на максимальное значение совокупности ско-
рости и угла
    if (f_znach_pop_inp[0] > ((float)(18720)))
f_znach_pop_inp[0] = ((float)(18720));
    if (f_znach_pop_inp[0] < -((float)(18720)))
f_znach_pop_inp[0] = -((float)(18720));
```

```

//Это собственно закон управления
f_por_upr[0]=1.854477629*f_por_upr[1]-
0.854477629*f_por_upr[2]+0.00573507*f_znach_por_inp[1]-
0.005618689*f_znach_por_inp[2];
//Ограничение на переменные ПИ регулятора (чтобы не на-
капливал сверхмаксимального управления)
if (f_por_upr[0] > ((float)(18720))) f_por_upr[0] =
((float)(18720));
if (f_por_upr[0] < -((float)(18720))) f_por_upr[0] =
-((float)(18720));
//Запоминание предыдущих значений
f_znach_por_inp[2]=f_znach_por_inp[1];
//U(K-2) := U(K-1)
f_znach_por_inp[1]=f_znach_por_inp[0];
//U(K-1) := U(K) здесь U и Y используются по
отношению к регулятору
f_por_upr[2]=f_por_upr[1]; //Y(K-2)
:= Y(K-1)
f_por_upr[1]=f_por_upr[0]; //Y(K-1)
:= Y(K)
//Далее присвоение управления ШИМУ
if (f_por_upr[0] < 0) {Znach_Reg_PWM = (Uint16)(-
f_por_upr[0]);} //Вычисление модуля управления
else Znach_Reg_PWM = (Uint16)(f_por_upr[0]);
if (Znach_Reg_PWM > 1248) Znach_Reg_PWM = 1248;
//ограничение величины управления максимальным значением реги-
стра ШИМа
if (f_por_upr[0]<0)
{ //Движение в +U по шкале градусов
CMPR2=0;
//3Pmpop, 4Pmpop, станд в -U по шкале
градусов
CMPR1=(Uint16)Znach_Reg_PWM; //1Pmpop, 2Pmpop,
станд в +U по шкале градусов
}
else
{ //Движение в -U по шкале градусов

```



```
        CMPR1=0;
        //1Pmpop, 2Pmpop, станд в +U по шкале
градусов
        CMPR2=(Uint16)Znach_Reg_PWM; //3Pmpop, 4Pmpop,
станд в -U по шкале градусов
    }
}
```

Здесь `Znach_Reg_PWM` это переменная типа `Uint16`, значение которой присваивается регистру, который отвечает за скважность ШИМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был изложен «путь», который был пройден при реализации закона управления аналогового регулятора на микроконтроллере TMS320F240. В основном способ реализации, начиная с передаточной функции и заканчивая программным кодом, очень похож на изложенный [2–4],

Как показал эксперимент, получившаяся реализация регулятора вполне успешно справляется со своей задачей.

Также данная последовательность действий может применяться при разработке новых устройств управления, когда регулятор уже имеется в виде передаточной функции, вычисленной аналитически, и наступает этап реализации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б.* Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
2. *Денисенко В.* ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 1 [Электронный ресурс] // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97. – URL: [www.cta.ru/cms/f/364276.pdf](http://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf) (дата обращения: 19.03.2015).
3. *Fedorov A.* Корректная реализация разностной схемы ПИД регулятора [Электронный ресурс]. – Опубликовано в Интернет: 06.05.2012. – URL: <http://habrahabr.ru/post/143388/> (дата обращения: 22.03.2015).
4. *Fedorov A.* ПИД-регулятор своими руками [Электронный ресурс]. – Опубликовано в Интернет: 18.06.2012. – URL: <http://habrahabr.ru/post/145991/> (дата обращения: 22.03.2015).
5. PID control [Electronic resource] // Emile's Home-Brewing Site. – 2011. – Last update: May, 14th 2015. – URL: [http://www.vandelogt.nl/htm/regelen\\_pid\\_uk.htm](http://www.vandelogt.nl/htm/regelen_pid_uk.htm) (дата обращения: 02.06.2015).

6. *Зайчиков А.* Микроконтроллеры в управлении летательными аппаратами. ПИД-регулятор [Электронный ресурс] // Паркфлаер: web-сайт сообщества любителей радиоуправляемых моделей. – Опубликовано в Интернет: 23.05.2013. – URL: [http://www.parkflyer.ru/blogs/view\\_entry/1525/](http://www.parkflyer.ru/blogs/view_entry/1525/) (дата обращения: 21.04.2015).

7. *Toochinda V.* Digital PID controllers [Electronic resource] / RDIPt, Department of Mechanical Engineering Kasetser University. – [S. l.], June 2011. – URL: <http://www.scilab.ninja/doc/b4/pid.pdf> (accessed: 22.03.2015).

8. TMS320F240 DSP Controller (Rev. E). – Dallas, Texas: Texas Instruments, 2002. – 105 p. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f240.pdf> (accessed: 22.03.2015).

9. *Керниган Б.В., Рутчи Д.М.* Язык программирования СИ: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2009. – 292 с.

10. *Джехани Н.* Программирование на языке Си: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 270 с.

**Колкер Алексей Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – обработка данных и изображений. Имеет более 30 публикаций. E-mail: [a.kolker@corp.nstu.ru](mailto:a.kolker@corp.nstu.ru)

**Шамаяев Федор Валерьевич** – магистрант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [fedia\\_8@mail.ru](mailto:fedia_8@mail.ru)

## Transition from analog to digital implementation of the controller<sup>\*</sup>

**A.V. Kolker<sup>1</sup>, F.V. Shamaev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph. D. (Eng.), associate professor. E-mail: [a.kolker@corp.nstu.ru](mailto:a.kolker@corp.nstu.ru)*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student. E-mail: [fedia\\_8@mail.ru](mailto:fedia_8@mail.ru)*

This article describes in detail the approach to converting an analog implementation of the regulator to its digital implementation, with similar characteristics. The main task is to convert the analog circuit control law to the code for the C programming language. As the initial representation of the analog controller form is taken an electric circuit diagram on which, by means of operator substitutions, is identified the mathematical model, which is represented as a transfer function. Then, the transfer function is translated by Z-transform in the discrete rep-

---

<sup>\*</sup>Received 19 March 2015.

resentation, the recurrent form of which it is possible to implement by the program in text form for later execution on the microcontroller. In calculating the discrete transfer function it is necessary to consider an empirically found time of the program execution on the microcontroller. Another important task is to find the gain of the program regulator, which calculating is based on the transmission coefficient of the analog circuit, which precedes the microcontroller. When calculating the gain of the software part of the controller also taking into account the digit capacity of the result register and the input voltage range for the analog-to-digital converter, and the digit capacity of output register, in charge of the duty cycle signal PWM output from microcontroller. For the gain calculation also important the value of limitation the control signal for each implementation of the regulator. As shown the intermediate experiment, it is necessary to introduce the program nonlinearities, such as a limit on the value of the internal state of the software controller and the value above which the value of internal variable corresponding to the control signal makes the pulse duration of the signal pulse-width modulation is maximum length. According to a latest experiment: this controller sufficiently provide the required parameters of the system.

**Keywords:** controller, microcontroller TMS320F240, transfer function, difference equation, Z-transform, the controller analog implementation, the controller software implementation, the C programming language

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-18-29

## REFERENCES

1. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [Fundamentals of the theory of continuous and discrete control systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.
2. Denisenko V. PID-regulatory: voprosy realizatsii. Ch. 1 [PID controllers: issues of implementation. Pt. 1]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii – Contemporary Technologies in Automation*, 2007, no. 4, pp. 86–97. Available at: [www.cta.ru/cms/f/364276.pdf](http://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf) (accessed 19.03.2015).
3. Fedorov A. *Korrektная realizatsiya raznostnoi skhemy PID regul'yatora* [Correct implementation of the difference scheme PID]. Published online: 06.05.2012. Available at: <http://habrahabr.ru/post/143388/> (accessed 22.03.2015)
4. Fedorov A. *PID-regulyator svoimi rukami* [PID controller with their hands]. Published online: 18.06.2012. Available at: <http://habrahabr.ru/post/145991/> (accessed 22.03.2015)
5. PID control. *Emile's Home-Brewing Site*. 2011. Last update: May, 14th 2015. Available at: [http://www.vandelogt.nl/html/regelen\\_pid\\_uk.htm](http://www.vandelogt.nl/html/regelen_pid_uk.htm) (accessed 02.06.2015)
6. Zaichikov A. Mikrokontrollery v upravlenii letatel'nyimi apparatami. *PID-regulyator* [Microcontrollers in control of the aircraft. PID regulator]. *Parkflaer*: web-site of the community of fans of radio-controlled models. Published online: 23.05.2013. Available at: [http://www.parkflyer.ru/blogs/view\\_entry/1525/](http://www.parkflyer.ru/blogs/view_entry/1525/) (accessed 21.04.2015)

7. Toochinda V. *Digital PID controllers*. RDiPT, Department of Mechanical Engineering Kasetert University, June 2011. Available at: <http://www.scilab.ninja/doc/b4/pid.pdf> (accessed 22.03.2015)

8. *TMS320F240 DSP Controller (Rev. E)*. Dallas, Texas, USA, Texas Instruments, 2002. 105 p. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f240.pdf> (accessed 22.03.2015)

9. Kernighan B.W., Ritchie D.M. *The C programming language*. Second ed. New Jersey, Prentice Hall, 1988. 274 p. (Russ. ed.: Kernigan B.V., Ritchi D.M. *Yazyk programmirovaniya Si*. Translated from English. Moscow, Vil'yams Publ., 2009. 292 p.).

10. Gehani N. *C: An advanced introduction*. New York, USA, Computer Science Press, 1985. 332 p. ISBN 0-88175-053-0 (Russ. ed.: Dzhekhani N. *Programirovanie na yazyke Si*. Translated from English. Moscow, Radio i svyaz', 1988. 270 p.).