

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

А. А. Сидорова

Институт кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета, 634050, Томск, Россия

УДК 681.51

Рассмотрены методы настройки пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов) систем автоматического управления технологическими процессами на примере пароперегревателя котла ТП-87. Эффективный метод настройки выбран на основе проведенного сравнительного анализа методов настройки регуляторов: метода амплитудного оптимума, модифицированного метода Циглера – Никольса, методов Стогестада, Куна, Шеделя и метода, основанного на реакции на ступенчатое воздействие.

Ключевые слова: метод настройки, ПИД-регулятор, объект управления, параметр, передаточная функция, переходный процесс.

The article describes the proportional-integral-derivative controller (PID) tuning methods of automatic process control systems example superheater boiler TP-87. The effective tuning method is selected on the basis of the tuning methods comparative analysis: optimum amplitude, modified Ziegler–Nichols, Stogestada, Kuhn, Schedel and the method based on the step response.

Key words: tuning method, PID controller, control object, parameter, transfer function, transient.

Введение. В современном производстве широко применяются системы автоматизации и промышленные регуляторы. В настоящее время в автоматизированных системах управления технологическими процессами наиболее часто встречающимся регулятором является пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). Использование ПИД-регулятора в системе управления позволяет повысить быстродействие и точность. Однако это может быть достигнуто только при оптимальных настройках регулятора. Поэтому при разработке систем автоматического регулирования (САР) одной из основных задач является адекватная настройка параметров ПИД-регулятора. Существует большое количество методов настройки ПИД-регуляторов, однако многие из них либо чрезмерно трудоемки, либо не обладают необходимой точностью. Как правило, применение этих методов позволяет обеспечить устойчивость системы управления, но не гарантирует ее качественную работу. Поэтому важно не только корректно настроить ПИД-регулятор, но и выбрать наиболее подходящий для данного объекта управления метод настройки.

Существование большого числа различных методов настройки ПИД-регуляторов технологических процессов [1–3] приводит к необходимости проведения сравнительного анализа раз-

работанных методов и определению наиболее эффективного метода для конкретного класса объектов. Для объективного анализа сравнение полученных показателей качества возможно при настройке ПИД-регуляторов применительно к одному объекту управления. В качестве объекта управления был выбран непрерывный динамический объект с транспортным запаздыванием – пароперегреватель котла ТП-87, описываемый по каналу управления расход на впрыск – температура перегретого пара передаточной функцией [4]

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{0,37}{(1,53p + 1)(0,93p + 1)} e^{-0,2p}.$$

Метод амплитудного оптимума. Рассмотрим метод настройки ПИД-регулятора – амплитудный оптимум, или бетрагсоптимум. Основной идеей метода является поддержание на уровне единицы величины передаточной функции замкнутого контура регулирования по управляющему воздействию. При использовании метода бетрагсоптимума как принципа проектирования САР рассматриваются одноконтурные системы регулирования, в которых передаточная функция объекта по управляющему воздействию имеет вид [5]

$$W(s) = k \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} e^{-s\tau},$$

где k – пропорциональный коэффициент передачи; τ – время задержки.

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид

$$W(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s,$$

где k_p, k_i, k_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный параметры ПИД-регулятора соответственно.

Искомые параметры могут быть найдены из матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} k_p \\ k_i \\ k_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_1 & A_0 & 0 \\ -A_3 & -A_2 & -A_1 \\ -A_5 & A_4 & -A_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0,5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты транспонированной матрицы могут быть вычислены по следующим формулам, представленным в [5]:

$$\begin{aligned} A_0 &= k, \\ A_1 &= k(a_1 - b_1 + \tau), \\ &\dots\dots\dots \\ A_k &= k \left((-1)^{k+1} (a_k - b_k) + \sum_{i=1}^k (-1)^{k+i} \frac{\tau^i b_{k-i}}{i!} \right) + \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^{k+i-1} A_i a_{k-i}. \end{aligned}$$

Рассмотрим данный метод на примере объекта управления с передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{0,37}{1,4229s^2 + 1,56s + 1} e^{-0,2s}.$$

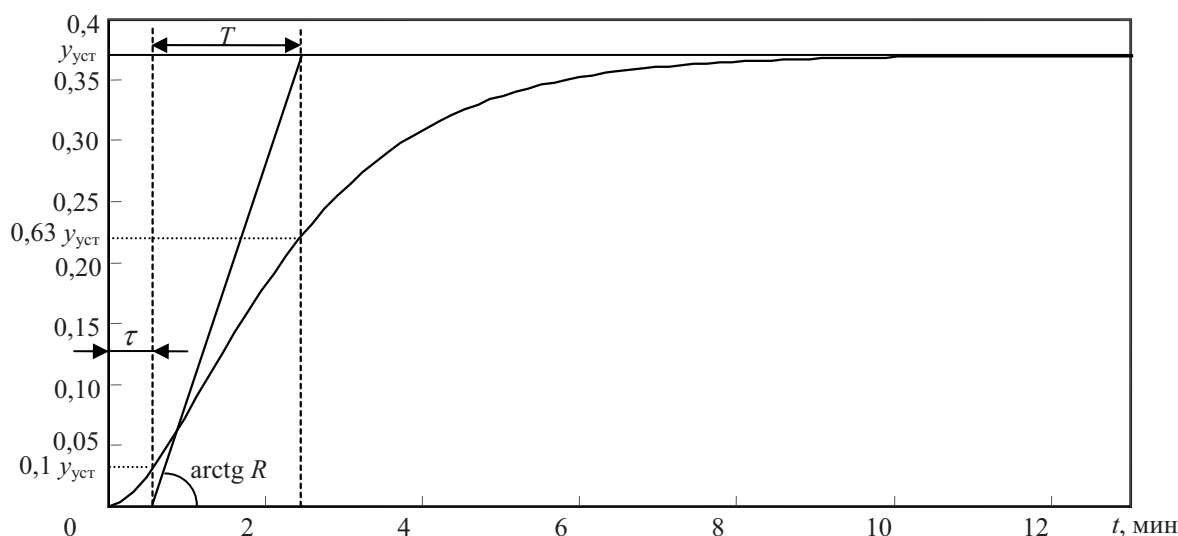


Рис. 1. Определение коэффициентов по переходной характеристике

Используя указанные выше формулы [2], найдем значения коэффициентов матрицы: $A_0 = 0,37$, $A_1 = 0,984$, $A_2 = 1,887$, $A_3 = 3,223$, $A_4 = 5,204$, $A_5 = 8,153$. Решив матричное уравнение, найдем составляющие ПИД-регулятора: $k_p = 16,662$, $k_i = 6,757$, $k_d = 9,749$.

Смоделировав систему с найденными параметрами ПИД-регулятора, получим переходный процесс, представленный на рис. 1. Таким образом, с помощью метода амплитудного оптимума получены следующие показатели качества системы управления: перерегулирование $\sigma = 0,02\%$, время переходного процесса $t_p = 1,61$ мин.

Метод Стогестада. Принцип синтеза ПИД-регулятора с использованием метода Стогестада состоит в следующем: по идентифицированным параметрам модели объекта управления определяются необходимые параметры настройки регулятора. Для апериодического звена второго порядка с транспортным запаздыванием параметры ПИД-регулятора могут быть найдены по формулам [6]

$$k_p = \frac{T_1}{k(T_c + \tau)}, \quad T_i = \min[T_1; c(T_c + \tau)], \quad T_d = T_2, \quad (1)$$

где T_1 , T_2 , k , τ – параметры объекта; c – параметр, обеспечивающий апериодический вид переходного процесса на выходе системы управления пароперегревателем котла (в [6] предлагается считать $c = 4$). В данном случае компенсация внешнего возмущения может стать достаточно медленной. Для того чтобы получить быструю компенсацию возмущения, предложено принять $c = 2$. Недостатком такого уменьшения значения переменной c является несколько большее перерегулирование на выходе системы управления.

Проблема идентификации не рассматривалась, предполагалось, что модель объекта управления уже идентифицирована и известна. С учетом формул (1) найдем настроечные параметры ПИД-регулятора по методу Стогестада:

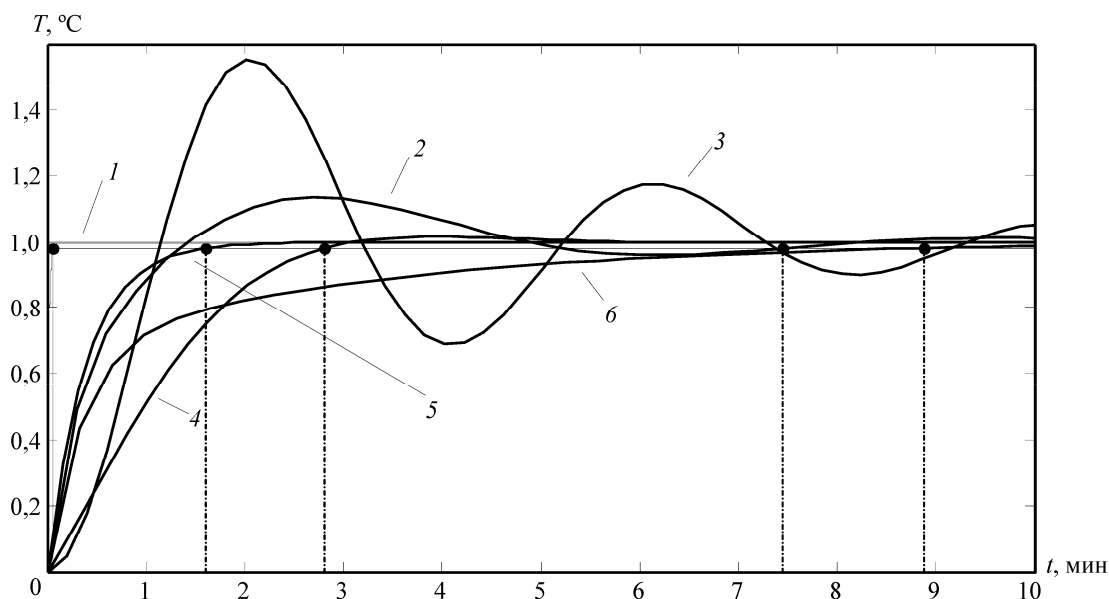


Рис. 2. Переходные процессы на выходе систем с ПИД-регуляторами, настроенными с использованием различных методов:

- 1, 2 – методы Шеделя, Стогестада; 3 – метод, основанный на реакции на ступенчатое воздействие; 4 – метод Куна; 5 – метод, основанный на амплитудном оптимуме; 6 – модифицированный метод Циглера – Никольса

$$k_p = \frac{1,53}{0,37(0,2 + 0,2)} = 10,3, \quad T_i = \min[1,53; 2(0,2 + 0,2)] = \min[1,53; 0,8] = 0,8 \text{ мин},$$

$$T_d = T_2 = 0,93 \text{ мин.}$$

На рис. 2 представлен переходный процесс на выходе системы управления с ПИД-регулятором, настроенным по методу Стогестада.

Метод Циглера – Никольса. Рассмотрим модифицированный метод Циглера – Никольса [7], предусматривающий следующие этапы настройки ПИД-регулятора: система управления должна быть переведена в ручной режим работы, регулятор – в режим П-регулирования. Параметр k_p должен увеличиваться до тех пор, пока на выходе контура управления не будет обеспечен подходящий вид переходного процесса (с некоторым перерегулированием). Модификация метода настройки заключается в том, что система не выводится на границу области устойчивости, как в основном методе Циглера – Никольса. Тем самым класс объектов, к которым может быть применен данный метод настройки регулятора, значительно расширяется [8]. Расчетные настроечные параметры ПИД-регулятора для указанного выше объекта управления по модифицированному методу Циглера – Никольса приведены в табл. 1. На рис. 2 представлен переходный процесс на выходе системы управления с ПИД-регулятором, настроенным по данному методу.

Метод Куна. Параметром, характеризующим быстродействие любых рассматриваемых объектов, является суммарная постоянная времени T_Σ . Этот параметр был введен в начале 1960-х гг. [9] для системы с передаточной функцией общего вида

$$W(s) = \frac{k_s(1 + T_{D1}s)(1 + T_{D2}s) \cdots (1 + T_{Dm}s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s) \cdots (1 + T_ns)} e^{-sT_t},$$

Таблица 1

Параметры настройки и показатели качества систем с ПИД-регуляторами

Метод	k_p	k_i	k_d	$\sigma, \%$	$t_p, \text{мин}$
Амплитудный оптимум	16,622	6,757	9,749	0,02	1,61
Стогестада	10,3	12,9	9,6	13,4	7,45
Модифицированный метод Циглера – Никольса	8,0	2,1	7,6	0	8,88
Куна	5,4	2,5	1,7	1,64	2,81
Шеделя	332,5	124,8	242,7	7,4	0,06
Основанный на реакции на ступенчатое воздействие	9,21	11,05	0,026	55,3	12,9

где суммарная постоянная времени находится следующим образом:

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_2 + \dots + T_n - T_{D1} - T_{D2} - \dots - T_{Dm} + T_t.$$

Особенностью метода настройки Куна или метода "Т-правило" является возможность использования как передаточной функции объекта управления, так и переходной характеристики объекта на входное ступенчатое воздействие.

Метод настройки Куна основан на аппроксимации объекта звеном третьего порядка

$$W(s) = \frac{k_s}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)},$$

где $T_1 = T_2 = T_3 = T_{\Sigma}/3$.

Передаточная функция прямого канала системы с ПИД-регулятором имеет вид

$$W_{\text{паз}}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \frac{k_s}{\left(\frac{T_{\Sigma}}{3} s + 1 \right)^3} = \frac{k_p k_s (1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s \left(\frac{T_{\Sigma}}{3} s + 1 \right)^3}.$$

Параметры ПИД-регулятора T_i и T_d выбираются таким образом, чтобы компенсировать влияние двух полюсов. Данное условие имеет вид следующего равенства:

$$\left(\frac{T_{\Sigma}}{3} s + 1 \right)^2 = 1 + T_i s + T_i T_d s^2. \quad (2)$$

Тогда

$$T_i = \frac{2T_{\Sigma}}{3}, \quad T_d = \frac{T_{\Sigma}}{6}. \quad (3)$$

После компенсации двух полюсов передаточная функция замкнутой системы принимает вид

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{k_p k_s}{\frac{T_i T_{\Sigma}}{3} s^2 + T_i s + k_p k_s}. \quad (4)$$

Параметр настройки k_p выбирается таким образом, чтобы коэффициент демпфирования контура был равен $\sqrt{2}/2$. По мнению специалистов, такой коэффициент демпфирования дает оптимальную динамику системы в отношении времени переходного процесса и перерегулирования. Подставляя формулы (3) в (4), с учетом (2) получаем

$$k_p = k_s^{-1}.$$

Таблица 2

Настройка ПИД-регулятора по методу Куна

Вид настройки	Параметры регулятора		
	k_p	T_i	T_d
Нормальная	$1/k_s$	$0,66T_\Sigma$	$0,17T_\Sigma$
Быстрая	$2/k_s$	$0,80T_\Sigma$	$0,12T_\Sigma$

Метод Куна включает два вида настройки: быструю и медленную (табл. 2). Быстрая настройка регулятора применима для систем с объектами первого или второго порядка; нормальная ("медленная", "осторожная") настройка, наоборот, почти всегда дает хорошие результаты для систем управления с объектами более высокого порядка.

Метод Шеделя. Метод Шеделя основан на принципе каскадного коэффициента демпфирования. В методе обобщается понятие коэффициента демпфирования на случай системы третьего порядка. Для системы с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}$$

справедливы следующие выражения [10]:

$$a_1^2 - 4d_0^2 a_2 = 0, \quad a_2^2 - 4d_1^2 a_1 a_3 = 0.$$

Параметры ПИД-регулятора должны быть выбраны таким образом, чтобы коэффициенты демпфирования системы были равны $d_0 = \sqrt{2/3}$, $d_1 = 0,5$.

В случае объекта с передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{k e^{-sT_t}}{\prod_{i=1}^n (1 + sT_i)} \approx \frac{k e^{-sT_t}}{\tilde{T}_3^3 s^3 + \tilde{T}_2^2 s^2 + \tilde{T}_1 s + 1}$$

выполняется переход к формуле

$$W(s) = \frac{k}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1},$$

где

$$T_1 = \tilde{T}_1 + T_t, \quad T_2^2 = \tilde{T}_2^2 + \tilde{T}_1 T_t + 0,5 T_t^2, \\ T_3^3 = \tilde{T}_3^3 + \tilde{T}_2^2 T_t + \frac{1}{2} \tilde{T}_1 T_t^2 + \frac{1}{6} T_t^3.$$

Параметры ПИД-регулятора рассчитываются по следующим формулам:

$$T_d = \frac{T_2^2}{T_1} - \frac{T_3^3}{T_2^2}, \quad T_i = \frac{T_1^2 - T_2^2}{T_1 - T_d}, \quad k_p = \frac{0,37 T_i}{k(T_1 - T_i)}.$$

На рис. 2 представлен переходный процесс на выходе системы управления с ПИД-регулятором, настроенным по методу Шеделя.

При настройке ПИД-регулятора методом Шеделя уменьшается время переходного процесса на выходе системы, незначительно увеличивается перерегулирование (менее 10 %) по сравнению с другими исследуемыми методами.

Метод, основанный на реакции на ступенчатое воздействие. Рассмотрим метод настройки ПИД-регулятора, основанный на реакции объекта управления на ступенчатое воздействие. Для этого размыкаем обратную связь и с помощью П-регулятора подаем на объект ступенчатое воздействие, уровень которого не вызовет нежелательных реакций объекта. Затем зафиксируем выходную реакцию объекта [11]. Будем рассматривать объект управления с той же передаточной функцией. Реакция данного объекта на ступенчатое воздействие представлена на рис. 1.

Указав на графике переходного процесса уровни, равные 10 и 63 % установившегося значения, найдем величины T , τ и $R = y_{уст}/T$.

Для вычисления параметров ПИД-регулятора рекомендуется использовать следующие формулы [3]:

$$k_p = \frac{1,2}{R\tau}, \quad k_i = 2\tau k_p, \quad k_d = \frac{0,4\tau}{k_p}. \quad (5)$$

По формулам (5) определим параметры настройки ПИД-регулятора на основе переходной характеристики объекта: $k_p = 9,21$, $k_i = 11,05$, $k_d = 0,026$.

На рис. 2 представлен переходный процесс на выходе системы управления с ПИД-регулятором, настроенным по реакции на ступенчатое воздействие. С помощью метода настройки ПИД-регулятора по реакции объекта на ступенчатое воздействие определены следующие показатели качества: $\sigma = 55,3\%$, $t_p = 22,5$ с.

В табл. 1 представлены параметры настройки ПИД-регуляторов, проведенной по исследуемым методам для систем с объектом (пароперегреватель котла ТП-87). На рис. 2 приведены реакции замкнутых систем с ПИД-регуляторами, настроенными по шести методам, на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях.

В качестве оценки для сравнения результатов, полученных при исследовании методов, выберем следующие показатели качества: перерегулирование σ и время переходного процесса. По характеру переходных процессов на выходе систем с ПИД-регуляторами проанализируем показатели качества σ , t_p , полученные с использованием шести исследуемых методов (см. табл. 1).

Сравнивая исследуемые методы, можно сделать выводы, что расчеты по методу бетагсоптимума являются более трудоемкими, при этом необходимо использовать пакет вычислительных программ Mathcad. Однако результаты вычисления позволяют получить на выходе системы управления переходный процесс практически без перерегулирования и с высоким быстродействием. При настройке ПИД-регулятора по модифицированному методу Циглера – Никольса переходный процесс на выходе системы управления затянут. По сравнению с первоначальным методом Циглера – Никольса модификация имеет ряд преимуществ: отсутствие необходимости вывода системы на границу области устойчивости и перерегулирования в реакции на выходе системы (обеспечивается апериодический вид переходного процесса). При настройке системы с ПИД-регулятором по методу Шеделя качество переходного процесса оказалось удовлетворительным, однако следует отметить, что параметры настройки ПИД-регулятора в несколько раз превышают параметры, найденные по другим методам. Настройка ПИД-регулятора по методу Стогестада обеспечивает высокое перерегулирование на выходе системы по

сравнению с настройкой по другим методам. Что касается метода, основанного на реакции на ступенчатое воздействие, то с помощью него можно достаточно быстро найти нужные параметры ПИД-регулятора, используя аппарат идентификации. Недостатком данного метода настройки является наличие значительного перерегулирования на выходе системы управления и низкое быстродействие. К тому же следует учитывать, что необходимые коэффициенты приближенно определяются по графику.

Выводы. В результате сопоставительного анализа методов настройки ПИД-регуляторов системы автоматического управления пароперегревателя котла ТП-87 выбран метод амплитудного оптимума. Показано, что этот метод наиболее эффективен при настройке ПИД-регулятора для системы с выбранным объектом и принятыми параметрами по сравнению с методом Стогстада, модифицированным методом Циглера – Никольса и методом Шеделя. При настройке ПИД-регулятора по методу амплитудного оптимума переходный процесс на выходе системы управления характеризуется незначительным перерегулированием и минимальным по сравнению с другими вариантами временем переходного процесса.

Список литературы

1. ШТЕЙНБЕРГ Ш. Е., СЕРЕЖИН Л. П., ЗАЛУЦКИЙ И. Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Пром. АСУ и контроллеры. 2004. № 7. С. 1–7.
2. КЛЮЕВ А. С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. М.: Издат. дом "Альянс", 2009.
3. WILLIS M. J. Proportional-integral-derivative PID controls // Proc. IEEE. 2009. N 10. P. 150–163. [Electron. resource]. <http://www.PAControl.com>.
4. СМЕРНОВ Н. И., САБАНИН В. Р., РЕПИН А. И. Оптимизация одноконтурных АСУ с многопараметрическими регуляторами // Пром. АСУ и контроллеры. 2005. № 7. С. 24–28.
5. VRANI D., КОСЦИАН J., STRMNIK S. Rejection tuning method for PID controllers. [Electron. resource]. <http://ascc2004.ee.mu.oz.au>.
6. CHIEN K. L., HRONES J. A., RESWICK J. B. An automatic control of generalized passive systems// IEEE Intern. conf. robotics and automation (1992). San Diego: IEEE Press, 1994. P. 175–185.
7. DORF R. C. Modern control system. Boston: Pearson Educat., 2008.
8. ZIGLER J. C. Optimum settings for automatic controllers / J. C. Zigler, N. B. Nichols. N. Y.: Res. Triangle Park, 1992.
9. Cohen-Coon tuning rules. [Electron. resource]. <http://blog.opticontrols.com/archives/383>.
10. ЕЛИСЕЕВА А. А., МАЛЫШЕНКО А. М. Анализ методов настройки параметров ПИД-регулятора // Молодежь и современные информационные технологии: Тр. 7-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. С. 15–16.
11. СИДОРОВА А. А. Исследование модифицированного метода настройки промышленного ПИД-регулятора // Тр. 18-й Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Томск: Изд-во ТПУ, 2012. С. 15–16.

Сидорова Анастасия Александровна – асп. Института кибернетики Томского политехнического университета; тел.: (382-2) 70-18-37; e-mail: sidorova@tpu.ru

Дата поступления – 03.10.12 г.