

УДК 658.012.011.56

## ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОИСКА НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

**Захарова О.В., Раков В.И.**

*ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл,  
e-mail: rakov2010vi@mail.ru, cvaig@mail.ru*

В статье предложена структура программно-инструментальных средств интерактивного поиска настроечных параметров для моделей цифрового пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора на основе формул прямоугольника, трапеции и Симпсона с применением методики Зиглера – Николса. Проведена оценка рынка средств настройки регуляторов последнего пятилетия, зарегистрированных в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», показавшая отсутствие программных продуктов поиска настроечных параметров для дискретных моделей цифрового ПИД-регулятора. Показана технология интерактивного поиска настроечных параметров цифрового ПИД-регулятора посредством изменения моделей регулирования, варьирования настроечных параметров, задания границ изменения выбранных параметров и шага изменения на примере модели цепи регулирования токового контура двигателя постоянного тока, что позволило оперативно корректировать цифровую модель ПИД-регулятора для достижения требуемой динамики регулируемого параметра.

**Ключевые слова:** цифровой ПИД-регулятор, программная система, моделирование, настроечные параметры регулятора

## INTERACTIVE SOFTWARE TOOLS TO SEARCH FOR TUNING PARAMETERS OF DIGITAL PID CONTROLLER

**Zakharova O.V., Rakov V.I.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel, e-mail: rakov2010vi@mail.ru, cvaig@mail.ru*

The paper proposes a structure of interactive software tools for search tuning parameters for model a digital proportional–integral–derivative (PID) controller based on the formulas of a rectangle, trapezoid and Simpson using the method of Ziegler–Nichols. Implemented the search programs the settings of the regulators over the last five years in the information search system of the Federal State Budgetary Institution «Federal Institute of Industrial Property». The search revealed a lack of programs to search for tuning parameters of a digital PID controller. The article describes the technology of interactive search tuning parameters of a digital PID controller by means of changing models of regulation, changes the tuning parameters of the controller, specify the boundaries modify the selected settings of the controller parameters and the step change. Tools for interactive search tuning parameters of a digital PID controller allow you to adjust the digital model of the PID controller to achieve the desired dynamics of the controlled parameter.

**Keywords:** digital PID controller, program system, simulating, tuning controller parameters

Настроечные параметры пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора являются результатом синтеза аналогового регулятора [3, 8]. Но переход к цифровому регулированию с полуречными значениями настроечных параметров сопровождается негативными последствиями регулирования: полученные значения параметров не гарантируют требуемую динамику. Необходима корректировка параметров регулятора по факту реализации в конкретной цифровой схеме, что подчас соизмеримо со сложностями начального синтеза регулятора.

С другой стороны, известны упрощённые методики настройки ПИД-регуляторов, например Ziegler–Nichols (1942) [10], Chien–Hrones–Reswick (1952) [6], Cohen–Coon (1953) [7], Wang–Juang–Chan (1995) [9], несравнимые по своей сложности с полноценным процессом синтеза

регулятора и уже только поэтому крайне полезные в практическом плане. Но и они при переносе значений настроечных параметров на организуемые процессы прямого цифрового регулирования (*Direct Digital Control – DDC*) требуют непосредственной корректировки для обеспечения подходящей динамики регулируемого параметра.

Поэтому потребность решения вопросов настройки цифровых регуляторов, то есть в реальности вопросов формирования подходящей дискретной модели ПИД-регулятора, не ослабевает и до настоящего времени является актуальной.

В работе предлагается система моделирования процессов цифрового регулирования и программные инструментальные средства для использования методики Зиглера – Николса (Ziegler–Nichols) для определения параметров *цифрового ПИД-регулятора* и улучшения динамики регулируемого параметра.

### Оценка рынка средств настройки регуляторов

Анализ программных продуктов последнего пятилетия, зарегистрированных в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» [5], показал наличие около полусотни программ настройки регуляторов, среди которых по эффективности, по-видимому, можно выделить следующие: «Нейросетевая надстройка над ПИД-регулятором для адаптации его параметров (Нейросетевой оптимизатор)» (Ю.И. Ерёменко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко; ФГАОУ ВПО «МИСиС»; Свидетельство о гос. регистрации № 2013614835, 2013), позволяющая подобрать подходящие настроечные параметры ПИД-регулятора на основе пятнадцати параметров о ситуации на объекте регулирования с помощью нейронной сети и базы производственных правил, существенным ограничением которой являются субъективные экспертные знания, обуславливающие весь процесс вывода; «Программа расчета коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с нечеткой адаптацией с четкими термножествами» (А.В. Богданов; ФГБОУ ВПО ОГУ; Свидетельство о гос. регистрации № 2016612060, 2016), настраивающая ПИД-регулятор с нечеткой адаптацией и строящая структуру системы производственных правил нечеткого регулятора с адаптацией коэффициентов ПИД-регуляторов, использующих четкие термножества. Существенным ограничением используемой методики, реализованной в программе, по нашему мнению, также является ориентация на специфические экспертные процедуры; «Исследование свойств пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора» (А.А. Павленко; ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова»; Свидетельство о гос. регистрации № 2015617749, 2015), позволяющая рассчитать оптимальные параметры *аналогового регулятора* по методу Зиглера – Николса и получить динамическую модель поведения объекта управления, что не совсем приемлемо для использования в структурах прямого цифрового управления; «Система регистрации и отображения параметров состояния и формирования команд управления и регулирования объектом» (ООО «Компания СК-Инжиниринг», Свидетельство о гос. регистрации № 2013619409, 2013), направленная на настройку *аналоговых* ПИД-регуляторов для обеспечения необходимого качества регулирования, что также недостаточно подходит для использования в *DDC*; «Параметрическая оптимизация системы с ПИД-регулятором по различным

критериям качества при помощи генетического алгоритма» (Н.Н. Куцкий, Н.Д. Лукьянов; ФГБОУ ВПО ИрГТУ; Свидетельство о гос. регистрации № 2014611433, 2014). Программа реализует параметрическую оптимизацию на базе генетического алгоритма за счет предварительного задания границ изменения настраиваемых параметров, критериев качества и параметров генетического алгоритма. Результаты работы программы представлены в текстовом и графическом виде. Существенным ограничением используемой методики, реализованной в программе, по-видимому, является ориентация на настройку *аналоговых регуляторов*; «Исследование процесса настройки параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели» (А.В. Банникова, Н.А. Сергеева; ФГАОУ ВПО СФУ; Свидетельство о гос. регистрации № 2014616687, 2014). В программе можно задавать закон регулирования (пропорциональный, пропорционально-интегральный, ПИД), параметры управления, тип задающего воздействия и просматривать результаты моделирования в графической форме для *аналоговых регуляторов*; «Гибридный нейросетевой ПИД-регулятор системы управления квадрокоптера» (А.А. Евгенов; ФГБОУ ВПО ЮРГПУ (НПИ); Свидетельство о гос. регистрации № 2013661953, 2013). Программное средство позволяет вычислять оптимальные параметры *ПИД-регулятора* квадрокоптера без привязки к особенностям цифрового ПИД-регулятора; «Digital control system with PID Controller (DPC)» (В.П. Кривошеев, Б.А. Кан; ФГБОУ ВПО ВГУЭС; Свидетельство о гос. регистрации № 2014611772, 2014). Программная система позволяет рассчитать настроечные параметры цифровой одноконтурной системы управления с *аналоговым ПИД-регулятором* методом Гаусса – Зейделя; «Программный комплекс для автоматизации испытаний синхронных неавтономных электрических машин (SMTTest.exe)» (Д.А. Исцелемов, Э.В. Любимов; ФГБОУ ВПО ПНИПУ; Свидетельство о гос. регистрации № 2015660820, 2015), позволяющий осуществить поиск оптимальных параметров *аналогового ПИД-регулятора* с обратной связью по току возбуждения машины; «Программа имитационного моделирования управления центром тяжести крыла самолета в боковом движении» (О.В. Куприянова, Б.Н. Лелянов; ФГБОУ ВПО ТОГУ; Свидетельство о гос. регистрации № 2015615032, 2015). Программная система позволяет задавать постоянные коэффициенты *аналогового ПИД-регулятора* и просматривать результаты моделирования системы управления.

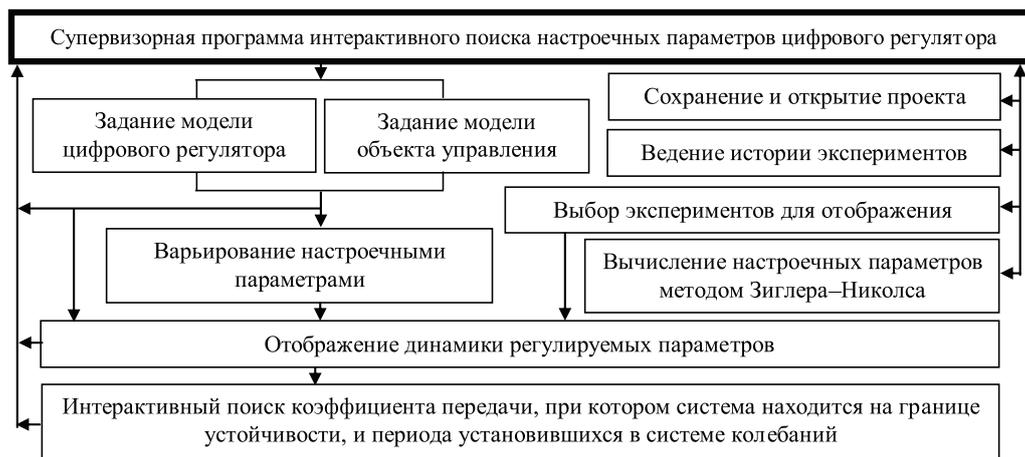


Рис. 1. Структура программного инструментария интерактивного поиска настроечных параметров цифрового ПИД-регулятора

Таким образом, оценивая рынок средств настройки регуляторов, можно говорить о том, что в последних отмеченных достижениях программных продуктов, как и ранее, не учитывают два основных качества функционирования цифрового ПИД-регулятора: во-первых, то, что управляющее воздействие вычисляется и формируется в процессоре регулирования по дискретным вариантам непрерывной модели регулятора, для каждого варианта из которых могут быть эффективными (подходящими) разные наборы настроечных параметров и, во-вторых, что все параметры дискретных моделей, включая и время дискретизации (время опроса датчиков, задержки реакции объекта регулирования и пр.), участвуют в формировании особенностей динамики регулируемых параметров.

**Программный инструментарий интерактивного поиска настроечных параметров цифрового регулятора**

Предлагаемая структура программного инструментария обусловлена двумя системными положениями: 1) процесс цифрового регулирования – это единство моделей регулятора и объекта регулирования и 2) каждый компонент цепи регулирования влияет на качество регулируемого параметра. Поэтому в предлагаемой структуре программного инструментария (рис. 1) реализовано: задание моделей цифрового ПИД-регулятора с различным представлением интеграла в непрерывной модели (по формулам прямоугольника, трапеции и Симпсона [4]):

$$U(t) = k_{\text{п}} \cdot \Delta x(t) + k_{\text{и}} \cdot \int_{\tau=0}^{\tau=t} \Delta x(\tau) d\tau + k_{\text{д}} \cdot \frac{d\Delta x(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $U(t)$  – управляющее воздействие в момент времени  $t$ ;  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{и}}$  и  $k_{\text{д}}$  – настроечные параметры;  $\Delta x(t)$  – рассогласование в момент  $t$  ( $t = n \cdot T$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $T$  – время опроса); задание модели объекта регулирования (ОУ) в виде токового контура двигателя постоянного тока:

$$x(nT) = \frac{x((n-1) \cdot T)}{1 + (T \cdot R) / L} + \frac{U((n-1) \cdot T) \cdot B \cdot T}{L + R \cdot T} + \frac{E \cdot B \cdot T}{L + R \cdot T}, \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление обмотки якоря;  $L$  – индуктивность цепи якоря;  $B$  – коэффициент передачи датчика тока;  $E$  – ЭДС самоиндукции; интерактивный поиск для пропорционального регулятора коэффициента передачи  $k_{\text{п}}$ , при котором система находится на границе устойчивости, и периода установившихся в системе колебаний  $\hat{T}$  для расчета настроечных параметров методом Зиглера – Николса; вычисление настроечных параметров по Зиглеру – Николсу [10]:

$$k_{\text{п}} = 0,6 \cdot \hat{k}_{\text{п}}, k_{\text{и}} = \frac{1,2 \cdot \hat{k}_{\text{п}}}{\hat{T}}, k_{\text{д}} = 0,075 \cdot \hat{k}_{\text{п}} \cdot \hat{T};$$

одновременное отображение динамики регулируемого параметра выбранных моделей автоматического регулирования с цифровым регулятором для выбора модели с требуемой динамикой регулируемого параметра; ведение истории экспериментов для сохранения моделей цифрового регулирования; изменение и выбор моделей для отображения динамики регулирования; варьирование с шагом настроечными параметрами ( $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{и}}$ ,  $k_{\text{д}}$ ) цифрового регулятора.

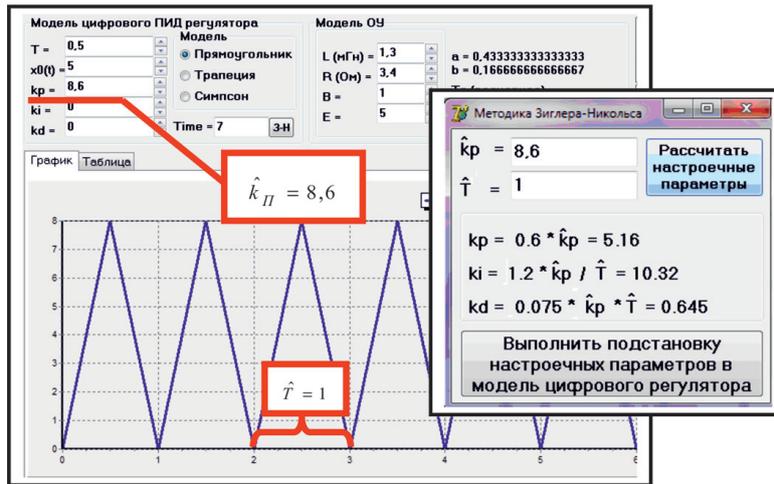


Рис. 2. Интерактивное определение  $\hat{k}_p = 8,6$ ,  $\hat{T} = 1$  (для пропорционального регулятора  $U(nT) = k_p \cdot \Delta x(nT) = 5 \cdot \Delta x(nT)$  и модели (2) с параметрами  $L = 1,3$ ;  $R = 3,4$ ;  $B = 1$ ;  $E = 5$ ) и вычисление настроечных параметров по методике Зиглера – Николса

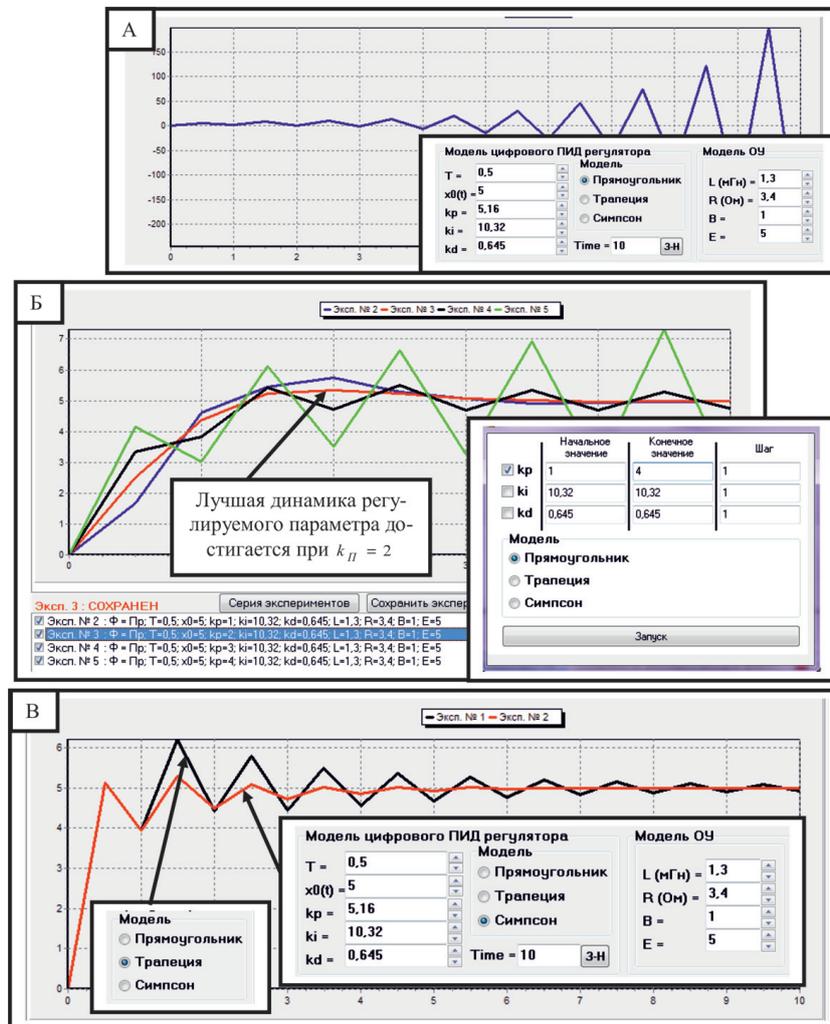


Рис. 3. Пример моделирования динамики регулируемого параметра, где: А) применена цифровая модель регулятора по формуле прямоугольника; В) варьирование настроечного параметра  $k_p$  для корректировки модели рис. 3, А; В) применены цифровые модели регулятора по формулам трапеции и Симпсона

### Интерактивный программный поиск настроечных параметров

Структура предложенного программного инструментария апробирована [1, 2] и показала возможности интерактивного подбора коэффициента передачи  $k_{\Pi}$  и дискретности  $T$  для пропорционального регулятора и вычисления настроечных параметров по методике Зиглера – Николса (рис. 2).

Моделирование системы регулирования, например, по формуле прямоугольника с полученными данными (рис. 2) показало неустойчивую динамику регулирования (рис. 3 А), которую можно подкорректировать предложенным инструментарием варьирования настроечных параметров (рис. 3 Б), а использование моделей цифрового ПИД-регулятора по методам трапеции и Симпсона в большинстве случаев дает положительные результаты (рис. 3 В).

### Выводы

Предложена структура программных инструментальных средств интерактивного поиска настроечных параметров цифрового ПИД-регулятора, основанная на системном представлении контура регулирования, отличающаяся применением методики Зиглера – Николса для различных дискретных моделей цифрового регулятора по формулам прямоугольника, трапеции и Симпсона.

*Исследование выполнено при поддержке «ОГУ имени И.С. Тургенева» по теме «Разработка программной системы поддержки*

*процесса управления в предаварийных состояниях для восстановления нормальной работы», приказ № 7-н/26 от 23.10.2013 г.*

### Список литературы

1. Захарова О.В., Солдатов С.С., Самойлов Д.А., Раков В.И. Программный инструментарий ПИД-регулирования на базе арифметико-логического устройства непосредственного формирования // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013611762, 2012.
2. Захарова О.В., Потлова Т.А., Королев П.Б., Раков В.И. Программа для организации управления цифровым контурным регулятором в предаварийных состояниях // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015612412, 2015.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2007. – 312 с.
4. Раков В.И. Моделирование цифровых регуляторов: монография / В.И. Раков, О.В. Захарова. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2014. – 128 с.
5. ФГБУ «Федеральный Институт промышленной собственности». Информационно-поисковая система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS\\_Ru](http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru) (дата обращения: 10.08.16).
6. Chien K.L. On automatic control of generalized passive systems / K.L. Chien, J.A. Hrones, J.B. Reswick // Transactions of the ASME. – 1952. – Vol. 74. – P. 175-185.
7. Cohen G.H. Theoretical considerations of retarded control / G.H. Cohen, G.A. Coon // Transactions of the ASME. – 1953. – Vol. 75. – P. 827-834.
8. Satya S. New techniques of PID controller tuning of a DC motor—development of a toolbox / S. Satya, O. Gupta // MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – Vol. 2. – P. 65-69.
9. Wang F.S. Optimal tuning of PID controllers for single and cascade control loops / F.S. Wang, W.S. Juang, C.T. Chan // Chemical Engineering Communications. – 1995. – P. 15-34.
10. Ziegler J.G. Optimum settings for automatic controllers / J.G. Ziegler, N.B. Nichols // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759-768.