

УДК 658.012.011.56

## О ПРОГРАММНОМ ИНСТРУМЕНТАРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ

**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 программных инструментальных средств для моделирования алгоритмов цифрового пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования на основе дискретных математических моделей формирования управляющих воздействий с представлением интеграла в континуальной модели по формулам прямоугольника, трапеции и Симпсона, обеспечивающая организацию одно-временного отображения динамики регулируемых параметров при использовании различных моделей цифрового регулирования и выбор наилучшей модели. Предложенный программный инструментальный подбор модели цифрового регулятора позволяет оперативно выбрать наиболее подходящую модель цифрового регулятора (математическую модель, настроечные параметры, период дискретизации) путем проведения серий экспериментов с указанием начальных значений, конечных значений, шага изменения настроечных параметров и периода дискретизации, а также графического представления результатов моделирования. Для повышения производительности процессов моделирования предложены программные средства ведения истории экспериментов для сохранения моделей схем цифрового регулирования и их оперативного использования.

**Ключевые слова:** цифровой ПИД-регулятор, программная система, моделирование, алгоритм управления

## ABOUT THE SOFTWARE TOOLS SIMULATION ALGORITHMS OF DIGITAL PID CONTROL

**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 proposed software tools for the simulation of algorithms digital proportional-integral-derivative regulation on the basis of mathematical models of digital control formulas for rectangle, trapezoid and Simpson. Software tools provide the simultaneous display of the dynamics of the controlled parameters when using different models of digital regulation. The proposed software tool selection model allows you to quickly select the best model digital controller (mathematical model, tuning controller parameters, the sampling period) through conducting a series of experiments with the tuning parameters of the controller initial values, final values, the step change and the period of sampling. The simulation results are presented in graphs. The paper proposed software tools for the organization of the history of the experiments for the preservation of digital automatic control systems.

**Keywords:** digital PID controller, program system, simulating, control algorithm

Динамика пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования (рисунок 1, [2, 6, 10]) описывается континуальной моделью:

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

При одинаковых настроечных параметрах и различном дискретном представлении интеграла в континуальной модели (\*) (по формуле прямоугольника – *Модель П*, по формуле трапеции – *Модель Т*, по формуле Симпсона – *Модель С*) [7, 8] динамика регулируемого параметра показывает различные результаты [2, 7]. Эксперименты показали [2, 7, 8], что для разных настроечных параметров и разных моделей объекта регулирования заранее нельзя указать модель цифрового регулятора, обеспечивающую наилучшие динамические

показатели, хотя бы потому, что перенос результатов синтеза аналоговых регуляторов на цифровую аппаратуру не гарантирует спроектированные показатели качества динамики регулируемого параметра, а замена континуальной модели регулирования на дискретную модель в конкретном программном обеспечении и программном ресурсе используемых процессоров не гарантирует достижение требуемых показателей устойчивости.

Все это делает актуальным создание программных средств либо по доведению дискретной модели регулирования до вида, обеспечивающего требуемую (аналоговую) динамику, либо по выбору требуемых методов и алгоритмов по достижению заданных целей регулирования.

В последние годы представлены системы моделирования, посредством которых можно было бы оценить настроечные параметры и отобразить изменение

регулируемых параметров [9]. По эффективности их применения выделяются: «Программа для управления и исследования регулируемых систем электропривода в среде СХ – Supervisor» (В.С. Кли- маш, М.А. Соколовский – ФГБОУ ВПО КнАГТУ, Свидетельство о гос. регистра- ции программ для ЭВМ № 2012618660, 2012); «Программа имитационного моде- лирования гибридной адаптивно-робаст- ной системы управления нелинейными объектами периодического действия» (Е.Л. Еремин, Б.Н. Лелянов, Е.А. Шеле- нок – ФГБОУ ВПО ТОГУ, Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2013661057, 2013); «Программа имита- ционного моделирования гибридной адап- тивно-робастной системы управления не- линейными периодическими объектами с запаздыванием» (Е.Л. Еремин, Б.Н. Ле- лянов, Е.А. Шеленок – ФГБОУ ВПО ТОГУ, Свидетельство о гос. регистра- ции программ для ЭВМ № 2013661060, 2013); «Программный комплекс «Синтез и анализ цифровых систем управления (Sintez&Analiz)» (В.П. Казанцев, А.Б. Пе- троченков, Д.А. Даденков – ФГБОУ ВПО ПНИПУ, Свидетельство о гос. регистра- ции программ для ЭВМ № 2013660457, 2013); «MexBIOS Development Studio – система автоматизированного проектиро- вания цифровых устройств управления» (А.С. Каракулов, В.С. Саидов, С.В. Ля- пушкин, Н.В. Гусев, М.В. Сливенко, Г.В. Родионов – ООО «Научно-производ- ственная фирма Мехатроника-Про», Сви- детельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2013617346, 2013); «Програм- ма управления электронно-цифровым ре- гулятором» (ООО НОЦ «ЛЕММА», Сви- детельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014616405, 2014); «Иссле- дование процесса настройки параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели» (А.В. Банни- кова, Н.А. Сергеева – ФГАОУ ВПО СФУ, Свидетельство о гос. регистрации про- грамм для ЭВМ № 2014616687, 2014); «Параметрическая оптимизация системы с ПИД-регулятором по различным крите- риям качества при помощи генетическо- го алгоритма» (Н.Н. Куцый, Н.Д. Лукья- нов – ФГБОУ ВПО ИрГТУ, Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014611433, 2014); «Программа для промышленного технологического ПИД- регулятора температуры» (Е.Н. Тумаев, Я.П. Иванов – ФГБОУ ВПО КубГУ, Сви- детельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015616303, 2015); «Модель электропоезда «Сапсан» в режиме тяги»

(А.М. Евстафьев, Д.В. Пегов, А.Н. Сычу- гов – ФГБОУ ВПО ПГУПС, Свидетель- ство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015614389, 2015); «Имитацион- ная модель цифровой системы управле- ния скоростью движения асфальтоуклад- чика» (В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, Н.Н. Зуйкова – ФГАОУ ВПО СФУ, Сви- детельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2016611927, 2016); «Имитацион- ная модель цифровой системы управления подачей и распределением смеси асфаль- тоукладчиком» (В.И. Иванчура, А.П. Про- копьев, Н.В. Кныш – ФГАОУ ВПО СФУ, Свидетельство о гос. регистрации про- грамм для ЭВМ № 2016611878, 2016); «Имитационная модель цифровой следя- щей системы управления нивелированием выглаживающей плиты асфальтоуклад- чика» (В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, А.П. Машукова – ФГАОУ ВПО СФУ, Сви- детельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2016611928, 2016); «Имита- ционная модель цифровой адаптивной системы управления рабочим органом асфальтоукладчика» (В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, Е.В. Говоруха – ФГАОУ ВПО СФУ, Свидетельство о гос. регистра- ции программ для ЭВМ № 2016611928, 2016); «Программа имитационного мо- делирования систем автоматического управления котлоагрегата ТЭЦ» (Е.В. Бо- голей, И.В. Боголей, Д.А. Теличен- ко – ФГБОУ ВПО АмГУ, Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2016611190, 2016).

Однако общим ограничением отмечен- ных программных средств является то, что они не позволяют, во-первых, моделировать и одновременно наблюдать динамику по разным дискретным моделям с целью оцен- ки эффективности и выбора подходящей дискретной модели и, во-вторых, констру- ировать модель или алгоритм регулирования, подходящий или даже наилучший для конкретных параметров схемы цифрового регулирования.

А это уже указывает на актуальность создания не столько программных средств моделирования процессов цифрового регу- лирования, сколько на актуальность реше- ния вопросов проектирования программного инструментария по моделированию методов и алгоритмов цифрового регулирования.

В работе предложены программные средства для организации одновременного моделирования и отображения процессов изменения регулируемых параметров по разным дискретным моделям цифрового ре- гулирования с целью получения наилучшей модели.

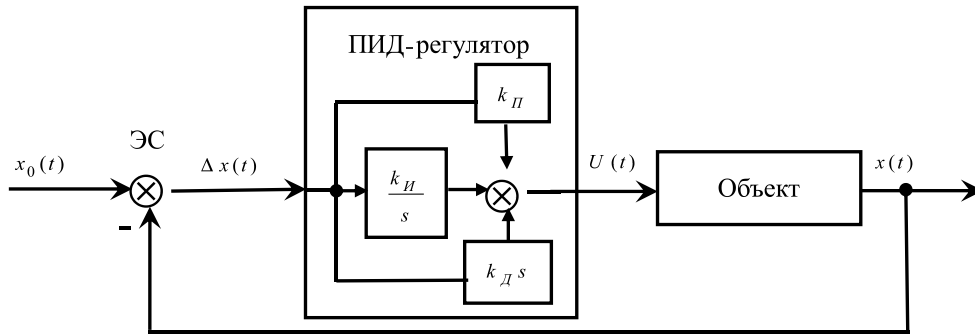


Рис. 1. Замкнутый контур регулирования по отклонению [8]:  $x_0(t)$  – задающее воздействие (уставка);  $\Delta x(t)$  – рассогласование в текущий момент (невязка, отклонение, ошибка);  $U(t)$  – управляющее воздействие;  $x(t)$  – регулируемая величина; ЭС – элемент сравнения ( $\Delta x(t)$  пропорционален  $x_0(t) - x(t)$ );  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$  – настроечные параметры регулятора;  
 оператор  $s(\bullet) = \frac{d}{dt}(\bullet)$  ( $t = n \cdot T$ , где:  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $T$  – время дискретизации)



Рис. 2. Функционал инструментария моделирования алгоритмов цифрового ПИД-регулирования

**Программный инструментарий.** Структура цепи регулирования (рис. 1) фактически обуславливает своими компонентами программные средства задания модели цифрового ПИД-регулятора, модели объекта управления (ОУ), а также программного средства, обеспечивающего требуемое отображение динамики регулируемого параметра. Для **модели регулятора** инструментарий должен обеспечивать выбор математической модели (*Модель П*, *Модель Т*, *Модель С*); задание периода дискретизации  $T$  ( $t = n \cdot T$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ ), вида уставки ( $x_0(t)$ ) и значений настроечных параметров  $k_P$ ,  $k_I$  и  $k_D$ . Для **модели объекта управления** инструментарий должен касаться задания параметров модели, например в случае токового контура двигателя постоянного тока – это параметры  $a$  и  $b$  ( $x(t) = a \cdot x(t-T) + b \cdot U(t-T) = a \cdot x((n-1) \cdot T) +$

$+ b \cdot U((n-1) \cdot T)$ ). Программный инструментарий для организации процессов отображения должен ориентироваться на вывод кривых и табличных данных результатов моделирования, что позволит оперативно оценить и подобрать модель цифрового регулирования. Причём здесь основным требованием выступает потребность одновременной фиксации и наблюдения динамики регулируемых параметров по нескольким моделям, что, в свою очередь, требует наличия программных средств ведения истории (добавление, удаление экспериментов, очистка истории) и выбора отображаемых экспериментов. Кроме того, нельзя не учитывать потребность в инструментах варьирования настроечных параметров и времени дискретизации для оценки и выбора подходящей цифровой модели ПИД-регулятора.

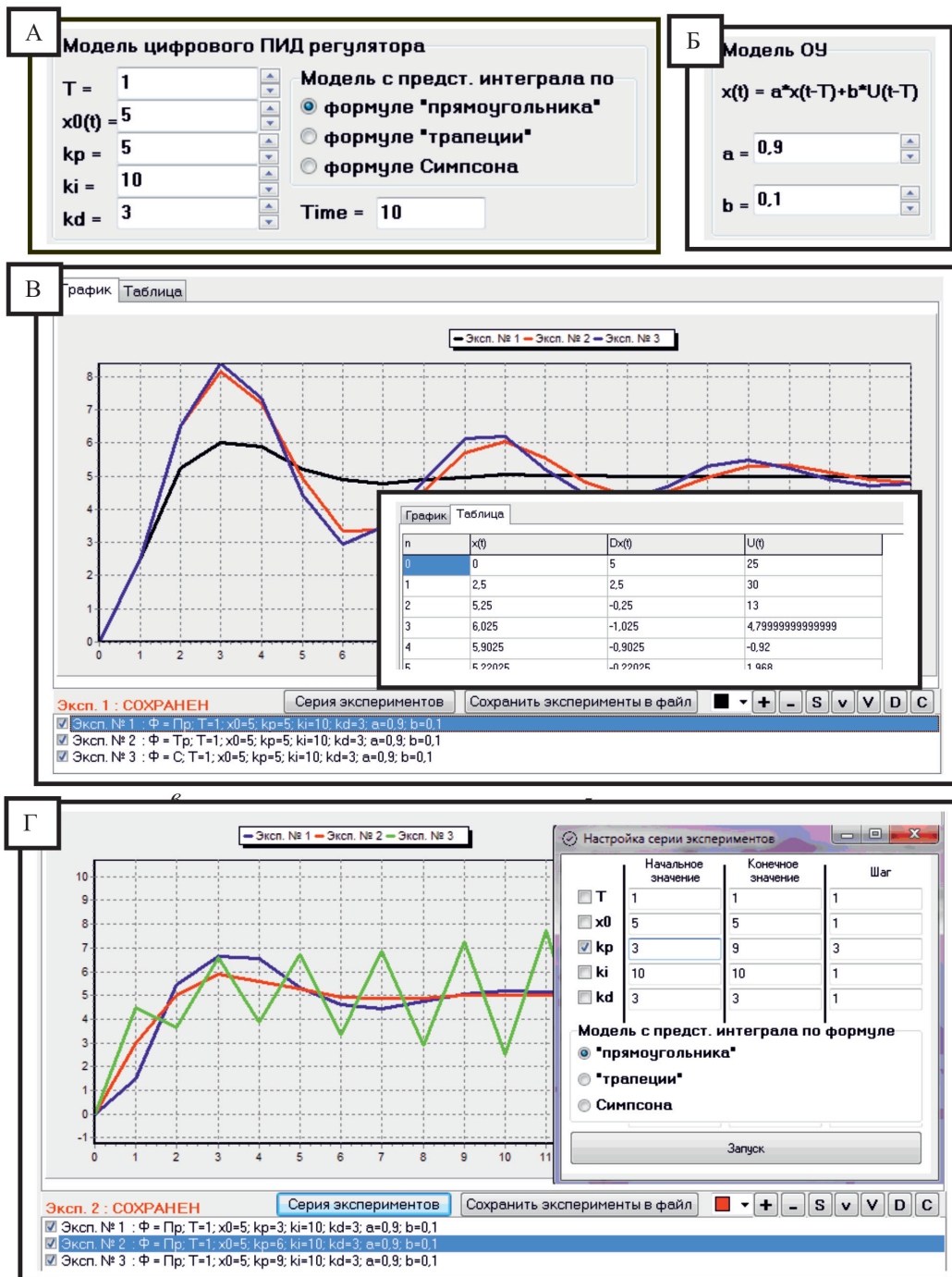


Рис. 3. Пример работы программного инструментария: А) задание модели цифрового регулятора; Б) задание модели ОУ (для случая  $a = 0,9$ ,  $b = 0,1$ ); В) отображение динамики регулируемых параметров, ведение истории и выбор отображаемых экспериментов; Г) варьирование настроечными параметрами и периодом дискретизации

Исходя из опыта создания программных систем ПИД-регулирования [1, 3, 4], основа структуры программной системы по реализации требуемого инструментария выражается функционалом (рис. 2).

Программные возможности инструментария. Реализация функционала (рис. 2) системой моделирования [5] показала эффективные возможности инструментария:

1) по заданию моделей (рис. 3, А, Б);

2) по оперативному выбору и организации различных сочетаний одновременного регулирования по дискретным моделям на основе замены интеграла в континуальной модели по формуле прямоугольника, трапеции и Симпсона (рис. 3, В);

3) по варьированию настроечных параметров и периода дискретизации для подбора подходящей модели цифрового регулятора (рис. 3, Г);

4) по оперативному расширению используемых дискретных моделей и организации процессов регулирования на их основе.

*Полученные результаты:* предложенная структура программных инструментальных средств моделирования алгоритмов цифрового ПИД-регулирования, исходя из необходимости реализации дискретного представления континуальной модели заменой в ней интеграла по формулам прямоугольника, трапеции и Симпсона, отличается средствами организации одновременного отображения динамики регулируемых параметров при использовании различных моделей цифрового регулирования и выбором наилучшей модели.

*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. Алиев Ю.О., Захарова О.В., Раков В.И. Программа реализации унифицированных алгоритмов наилучшего цифрового регулирования // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015616512, 2015.
2. Захарова О.В. Новая алгоритмическая модель для традиционного подхода цифрового регулирования // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8–2. – С. 274–280.
3. Захарова О.В., Сен Н.В., Раков В.И. Программа поддержки процесса ПИД регулирования при восстановлении нормальной работы // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014660839, 2014.
4. Захарова О.В., Ястребков А.Е., Раков В.И. Программа оперативной оценки динамики ПИД регулирования // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014615387, 2014.
5. 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.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы. – М.: Физматлит, 2007. – 312 с.
7. Раков В.И. Моделирование цифрового регулятора с превентивной оценкой погрешности на каждом шаге дискретизации. Часть 1: Дискретные модели / В.И. Раков, О.В. Захарова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 5. – С. 53–65.
8. Раков В.И. Моделирование цифровых регуляторов: монография / В.И. Раков, О.В. Захарова. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2014. – 128 с.
9. 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: 11.08.16).
10. Laskawski M. Influence of sampling on the tuning of PID controller parameters / M. Laskawski, M. Weislik // International Federation of Automatic Control (IFAC). – Poland, 2015. – P. 430–435.

#### References

1. Aliev Ju.O., Zaharova O.V., Rakov V.I. Programma realizacii unificirovannyh algoritmov nailuchshego cifrovogo regulirovaniya // Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2015616512, 2015.
2. Zaharova O.V. Novaja algoritmicheskaja model dlja tradicionnogo podhoda cifrovogo regulirovaniya // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 8–2. pp. 274–280.
3. Zaharova O.V., Sen N.V., Rakov V.I. Programma podderzhki processa PID regulirovaniya pri vosstanovlenii normalnoj raboty // Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2014660839, 2014.
4. Zaharova O.V., Jastrebkov A.E., Rakov V.I. Programma operativnoj ocenki dinamiki PID regulirovaniya // Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2014615387, 2014.
5. Zaharova O.V., Potlova T.A., Korolev P.B., Rakov V.I. Programma dlja organizacii upravlenija cifrovym konturnym reguljatorom v predavarijnyh sostojanijah // Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2015612412, 2015.
6. Kim D.P. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. T. 1: Linejnye sistemy. M.: Fizmatlit, 2007. 312 p.
7. Rakov V.I. Modelirovanie cifrovogo reguljatora s preventivnoj ocenкой pogreshnosti na kazhdom shage diskretizacii. Chast 1: Diskretnye modeli / V.I. Rakov, O.V. Zaharova // Promyshlennye ASU i kontrollery. 2014. no. 5. pp. 53–65.
8. Rakov V.I. Modelirovanie cifrovych reguljatorov: monografija / V.I. Rakov, O.V. Zaharova. Orel: FGBOU VPO «Gosuniversitet UNPK», 2014. 128 p.
9. FGBU «Federalnyj Institut promyshlennoj sobstvennosti». Informacionno-poiskovaja sistema [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS\\_Ru](http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru) (data obrashhenija: 11.08.16).
10. Laskawski M. Influence of sampling on the tuning of PID controller parameters / M. Laskawski, M. Weislik // International Federation of Automatic Control (IFAC). Poland, 2015. pp. 430–435.