

УДК 658.012.011.56

НОВЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПИД РЕГУЛЯТОРА

Захарова О.В.

Приокский государственный университет, Орёл, e-mail: cvaig@mail.ru

В статье предложен новый метод цифрового контурного регулирования на основе совместного использования дискретных формул ПИД регулирования, отличающийся превентивной оценкой реакции объекта управления на каждом такте управления для выбора управляющего воздействия. Выбранное управляющее воздействие для последующего такта управления соответствует той дискретной формуле ПИД регулирования, которая обеспечит наилучшую динамику регулируемого параметра на следующем такте. Для достижения минимальной задержки вычислений управляющих воздействий предложено использование параллельных вычислений в процессах оценки реакции объекта управления по каждой дискретной формуле ПИД регулирования. Предложен новый алгоритм параллельных вычислений управляющих воздействий, использующий представление интеграла в континуальной модели ПИД регулятора в виде формул «прямоугольников», «трапеций» и «Симпсона». Разработанный программный инструментальный, реализованный посредством унифицированных алгоритмов регулирования, позволил конструировать не только алгоритмы оптимального цифрового регулирования на основе известных дискретных формул, но и с учётом возможности применения алгоритмов смешанного регулирования для обеспечения требуемой динамики процесса регулирования.

Ключевые слова: цифровой регулятор, ПИД регулятор, управляющее воздействие, метод, алгоритм

NEW METHOD OF FORMATION OF CONTROL ACTIONS FOR PID CONTROLLER

Zakharova O.V.

*Educational and Research Institute of Information Technology «Priokskij State University»,
Orel, e-mail: cvaig@mail.ru*

The article proposes a new method of digital regulation based on using discrete formulas for PID control and evaluate the response of the control object at the next time point for the choice of the control action. For minimal latency, computing the control actions proposed the use of parallel computing in the processes of assessing the response of the control object for each discrete formula of the PID control. The article proposed an algorithm for parallel computation of control actions using the integral expressions in the continuum model the PID controller in the form of a formula «rectangle», «trapezoid» and «Simpson». Developed software tools allow for the design of optimal digital control algorithms using known formulas and algorithm of mixed regulation to ensure the required dynamics of the regulatory process.

Keywords: digital governor, PID controller, control action, method, algorithm

При разработке цифровых систем автоматического регулирования (рис. 1) модели, методы и алгоритмы формирования управляющих воздействий подбираются таким образом, чтобы обеспечить требуемую динамику процесса регулирования [2, 4–6].

Различные алгоритмы цифрового регулирования могут формировать разные управляющие воздействия, что приводит к необходимости проведения в такте управления превентивных оценок реакции объекта управления. Это легло в основу построения метода смешанного цифрового регулирования [3], воплощенного в программе реализации унифицированных алгоритмов наилучшего цифрового регулирования (рис. 2) [1].

В методе смешанного цифрового регулирования [3] для формирования управляющего воздействия в текущий момент времени $U_{cm}(nT)$ вычисляются управляющие воздействия по различным алгоритмам цифрового регулирования:

$$U_1(nT, U_{cm}((n-1)T), \\ x_{cm}(nT), x_{cm}((n-1)T), \dots), \\ \dots, \\ U_N(nT, U_{cm}((n-1)T), \\ x_{cm}(nT), x_{cm}((n-1)T), \dots),$$

моделируется реакция объекта управления на каждое сформирование управляющего воздействия $(x_1((n+1)T), x_{cm}(nT), U_1(nT), \dots), \dots, x_N((n+1)T), x_{cm}(nT), U_N(nT), \dots)$, рассчитывается невязка $(\Delta x_1((n+1)T), x_1((n+1)T), \dots, \Delta x_N((n+1)T), x_N((n+1)T))$ и выбирается алгоритм формирования управляющего воздействия, который привел к минимальному значению рассогласования:

$$\Delta x_1((n+1)T) < \dots < \Delta x_N((n+1)T) \Rightarrow U_1(nT), \\ \dots \dots \dots \\ \Delta x_N((n+1)T) < \dots < \Delta x_1((n+1)T) \Rightarrow U_N(nT).$$

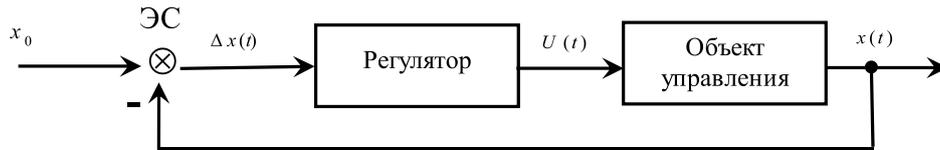


Рис. 1. Пример схемы замкнутой системы автоматического регулирования (САР), где: t – время (для цифровой САР $t = nT$, $n = 0, 1, 2, \dots$, T – время реакции объекта управления); x_0 – задающее воздействие, $\Delta x(t)$ – рассогласование (отклонение, ошибка) в текущий момент ($\Delta x(t)$ пропорционален $x_0 - x(t)$), $U(t)$ – управляющее воздействие, $x(t)$ – регулируемая величина, ЭС – элемент сравнения

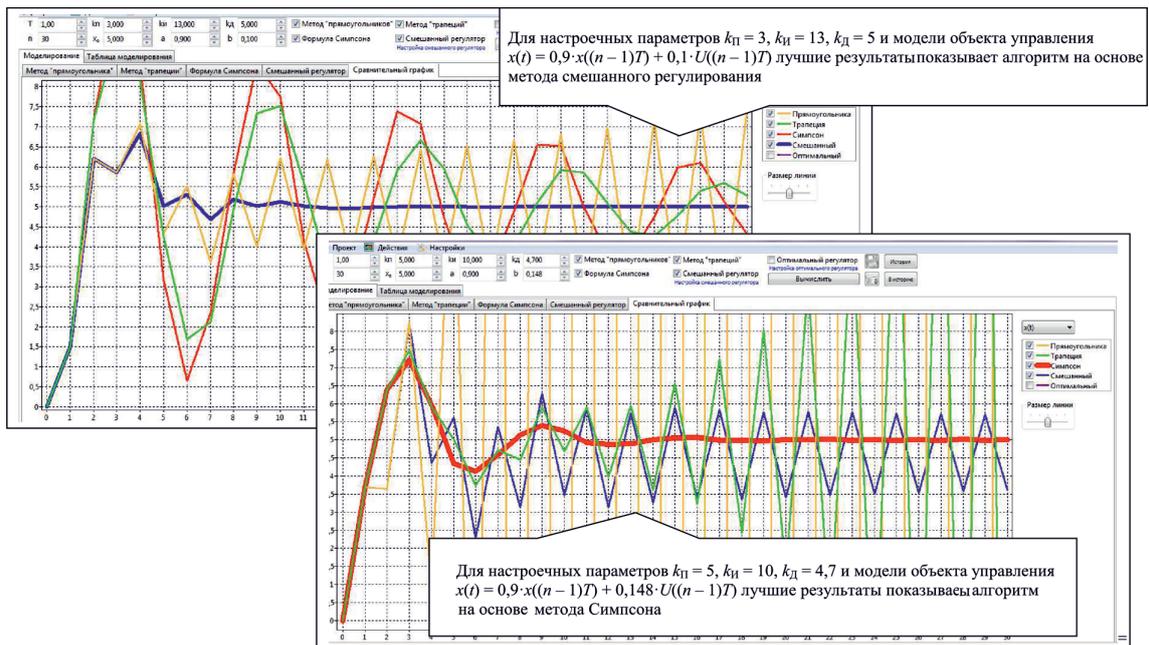


Рис. 2. Скриншоты программы реализации унифицированных алгоритмов наилучшего цифрового регулирования [1]

Экспериментирование с программным инструментарием [1] показало, что метод смешанного цифрового пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования, показывая в основном существенно лучшие результаты, в отдельных обстоятельствах приводит к неудачной динамике (рис. 2). Чтобы избежать таких ситуаций, можно попробовать дополнительно отслеживать динамику каждого алгоритма цифрового регулирования, вошедшего в основу построения алгоритма смешанного управления, что делает актуальным вопросы построения метода, основанного на выборе алгоритма на каждом шаге регулирования и приводит фактически к построению оптимального метода цифрового регулирования.

Для улучшения качества цифрового регулирования в работе предложен метод оп-

тимального регулирования и показано его удачное применение.

Метод цифрового оптимального регулирования:

I. Выбрать математические модели цифрового регулирования:

$$M_1, \dots, M_i, \dots, M_k,$$

где k – количество математических моделей цифрового регулирования.

II. Задать настроечные параметры и уставку.

III. В текущий момент времени $t = nT$ по выбранным математическим моделям $M_1, \dots, M_i, \dots, M_k$ рассчитать управляющие воздействия, каждое из которых зависит только от параметров своего процесса:

$$U_{A_1}(nT, U_{A_1}((n-1)T), x_{A_1}(nT), x_{A_1}((n-1)T), \dots), \dots,$$

$$U_{A_i}(nT, U_{A_i}((n-1)T), x_{A_i}(nT), x_{A_i}((n-1)T), \dots), \dots,$$

$$U_{A_k}(nT, U_{A_k}((n-1)T), x_{A_k}(nT), x_{A_k}((n-1)T), \dots).$$

IV. Смоделировать в следующий момент времени $t = (n+1)T$ реакции объекта управления на соответствующие управляющие воздействия:

$$U_{A_1}(nT) \rightarrow x_{A_1}((n+1)T, x_{A_1}(nT), U_{A_1}(nT), \dots), \dots,$$

$$U_{A_i}(nT) \rightarrow x_{A_i}((n+1)T, x_{A_i}(nT), U_{A_i}(nT), \dots), \dots,$$

$$U_{A_k}(nT) \rightarrow x_{A_k}((n+1)T, x_{A_k}(nT), U_{A_k}(nT), \dots).$$

V. Рассчитать рассогласования:

$$\Delta x_{A_1}((n+1)T, x_{A_1}((n+1)T)), \dots, \Delta x_{A_i}((n+1)T, x_{A_i}((n+1)T)), \dots, \Delta x_{A_k}((n+1)T, x_{A_k}((n+1)T)).$$

VI. Выбрать минимальное абсолютное значение ошибки:

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \min \left\{ \left| \Delta x_{A_1}((n+1)T) \right|, \dots, \left| \Delta x_{A_i}((n+1)T) \right|, \dots, \left| \Delta x_{A_k}((n+1)T) \right| \right\}$$

и соответствующую математическую модель формирования управляющего воздействия:

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_{A_1}((n+1)T) \right| \Rightarrow U_{omm}(nT) = U_{A_1}(nT), \dots,$$

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_{A_i}((n+1)T) \right| \Rightarrow U_{omm}(nT) = U_{A_i}(nT), \dots,$$

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_{A_k}((n+1)T) \right| \Rightarrow U_{omm}(nT) = U_{A_k}(nT).$$

Алгоритм цифрового оптимального ПИД регулирования с параллельными вычислениями:

I. Базовые алгоритмы цифрового ПИД регулирования: 1) на основе математической модели ПИД регулирования с раскрытием интеграла по формуле «прямоугольников» (A_{np}) [2, 3]; 2) на основе метода цифрового ПИД регулирования с представ-

лением интеграла по формуле «трапеций» (A_{tr}) [2, 3]; 3) на базе метода ПИД регулирования с раскрытием интеграла по формуле Симпсона (A_c) [3].

II. Задание настроечных параметров ($k_{п}$, $k_{и}$, $k_{д}$) и уставки x_0 .

III. Формирование управляющих воздействий по выбранным алгоритмам цифрового ПИД регулирования:

III. 1. Если $n = 0$ ($t = nT = 0 \cdot T = 0$), то:

III. 1.1. Невязка $\Delta x_{omm}(0) = x_0$ ($\Delta x_{omm}(0) = \Delta x_{np}(0) = \Delta x_{mp}(0) = \Delta x_c(0)$).

III. 1.2. Вычисление управляющего воздействия:

$$U_{omm}(0) = k_{п} x_0 \quad (U_{omm}(0) = U_{np}(0) = U_{mp}(0) = U_c(0)).$$

III. 2. Если $n = 1$ ($t = nT = 1 \cdot T = T$), то:

III. 2.1. Формирование невязки $\Delta x_{omm}(T) = x_0 - x_{omm}(T)$

$$(\Delta x_{omm}(T) = \Delta x_{np}(T) = \Delta x_{mp}(T) = \Delta x_c(T));$$

III. 2.2. Параллельное вычисление управляющих воздействий:

$$A_{np} \Rightarrow U_{np}(T) = \left(k_{п} + k_{и}T + \frac{k_{д}}{T} \right) \cdot \Delta x_{np}(T) - \frac{k_{д}}{T} \cdot x_0,$$

$$A_{mp} \Rightarrow U_{mp}(T) = U_c(T) \left(k_{п} + \frac{k_{и}}{2} \cdot T + \frac{k_{д}}{T} \right) \cdot \Delta x_{mp}(T) + \left(k_{и} \frac{T}{2} - \frac{k_{д}}{T} \right) \cdot x_0.$$

III. 3. Если $n = 2$ ($t = nT = 2T$), то:

III. 3.1. Параллельное формирование значений рассогласований: $\Delta x_{np}(2T) = x_0 - x_{np}(2T)$, $\Delta x_{mp}(2T) = \Delta x_c(2T) = x_0 - x_{mp}(2T)$.

III. 3.2. Параллельное вычисление управляющих воздействий:

$$A_{mp} \Rightarrow U_{mp}(nT) = U_{mp}((n-1)T) + \left(k_{II} + k_{II}T + \frac{k_D}{T} \right) \cdot \Delta x_{mp}(nT) + \left(-k_{II} - \frac{2k_D}{T} \right) \cdot \Delta x_{mp}((n-1)T) + \frac{k_D}{T} \cdot \Delta x_{mp}((n-2)T), \quad (1)$$

$$A_{mp} \Rightarrow U_{mp}(nT) = U_{mp}((n-1)T) + \left(k_{II} + \frac{k_{II}}{2} \cdot T + \frac{k_D}{T} \right) \cdot \Delta x_{mp}(nT) + \left(-k_{II} - \frac{2k_D}{T} + \frac{k_{II}}{2} \cdot T \right) \cdot \Delta x_{mp}((n-1)T) + \frac{k_D}{T} \cdot \Delta x_{mp}((n-2)T), \quad (2)$$

$$A_C \Rightarrow U_C(2T) = \left(k_{II} + k_{II} \frac{T}{3} + \frac{k_D}{T} \right) \cdot \Delta x_C(2T) + \left(k_{II} \frac{4T}{3} - k_D \frac{1}{T} \right) \Delta x_C(T) + \left(k_{II} \frac{T}{3} \right) \Delta x_C(0).$$

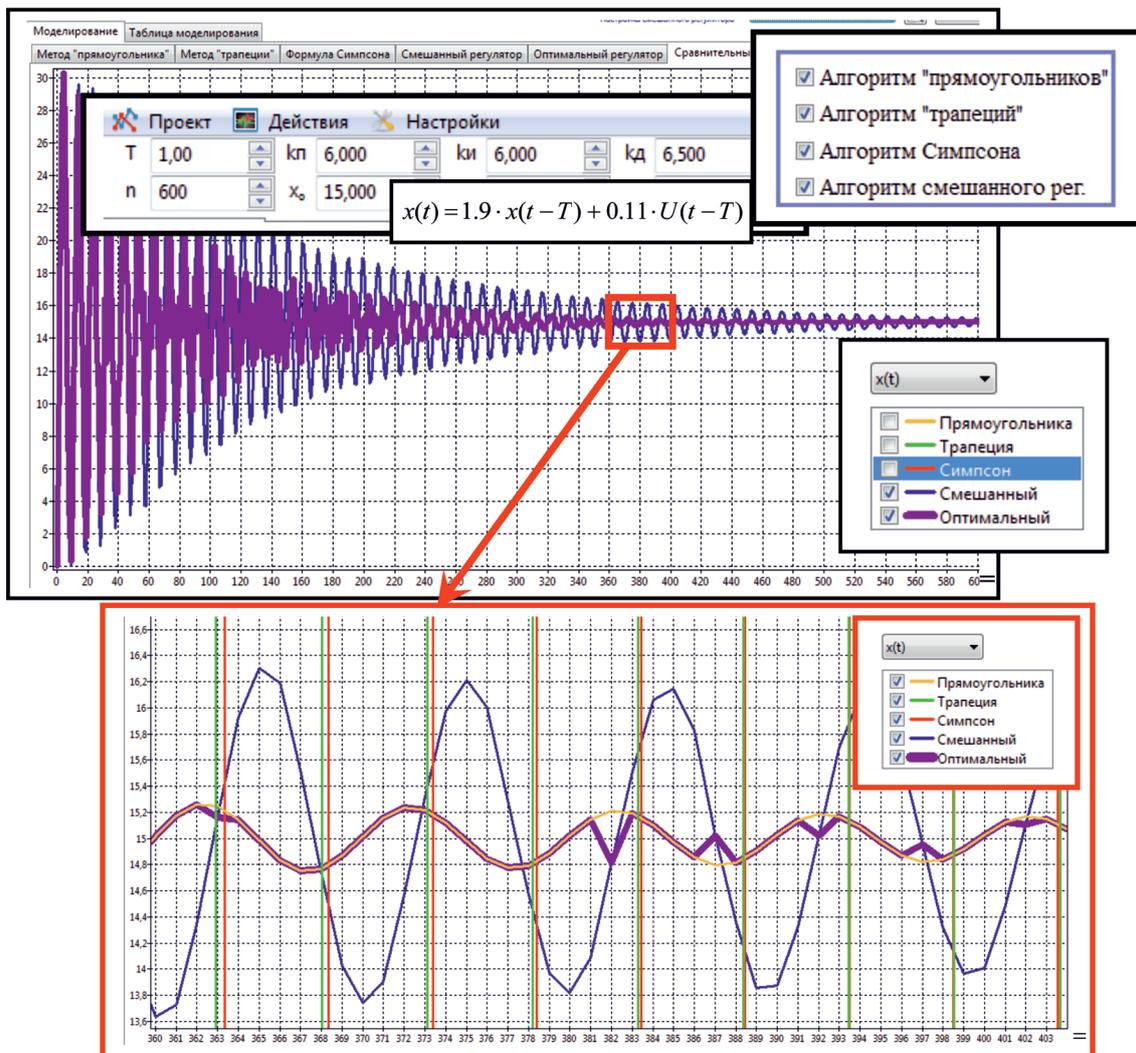


Рис. 3. Программный инструментальный оптимального ПИД регулирования [1]

III. 4. Если $n > 2$ ($t > 2T$), то:

III. 4.1. Параллельное формирование значений рассогласований: $\Delta x_{np}(2T) = x_0 - x_{np}(2T)$, $\Delta x_{mp}(2T) = x_0 - x_{mp}(2T)$, $\Delta x_C(2T) = x_0 - x_C(2T)$.

III. 4.2. Параллельное вычисление управляющих воздействий:

III. 4.2.1. Для $n = 2k + 1$, $k = 1, 2, \dots$:

$$A_{np} \Rightarrow U_{np}(nT) = (1), A_{mp} \Rightarrow U_{mp}(nT) = (2),$$

$$A_C \Rightarrow U_C(nT) = U_C((n-1)T) + \left(k_{II} + \frac{k_{II}}{2} \cdot T + \frac{k_{II}}{T} \right) \cdot \Delta x_C(nT) + \\ + \left(-k_{II} - \frac{2k_{II}}{T} + \frac{k_{II}}{2} \cdot T \right) \cdot \Delta x_C((n-1)T) + \frac{k_{II}}{T} \cdot \Delta x_C((n-2)T).$$

III. 4.2.2. Для $n = 2k$, $k = 2, 3, \dots$:

$$A_{np} \Rightarrow U_{np}(nT) = (1), A_{mp} \Rightarrow U_{mp}(nT) = (2),$$

$$A_C \Rightarrow U_C(nT) = U_C((n-1)T) + \left(k_{II} + k_{II} \frac{T}{3} + \frac{k_{II}}{T} \right) \cdot \Delta x_C(nT) + \\ + \left(k_{II} \cdot \frac{5T}{6} - k_{II} - k_{II} \frac{2}{T} \right) \cdot \Delta x_C((n-1)T) + \left(k_{II} \frac{1}{T} - k_{II} \frac{T}{6} \right) \cdot \Delta x_C((n-2)T).$$

IV. Параллельное моделирование реакций объекта управления в момент времени $t = (n+1)T$ на соответствующие управляющие воздействия:

$$U_{np}(nT) \rightarrow x_{np}((n+1)T, x_{np}(nT), U_{np}(nT)),$$

$$U_{mp}(nT) \rightarrow x_{mp}((n+1)T, x_{mp}(nT), U_{mp}(nT)),$$

$$U_C(nT) \rightarrow x_C((n+1)T, x_C(nT), U_C(nT)).$$

V. Параллельное моделирование рассогласований:

$$\Delta x_{np}((n+1)T) = x_0 - x_{np}((n+1)T),$$

$$\Delta x_{mp}((n+1)T) = x_0 - x_{mp}((n+1)T),$$

$$\Delta x_C((n+1)T) = x_0 - x_C((n+1)T).$$

VI. Выбор алгоритма расчета управляющего воздействия для $t = nT$, соответствующего минимальному смоделированному абсолютному значению невязки для $t = (n+1)T$:

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \min \left\{ \left| \Delta x_{np}((n+1)T) \right|, \left| \Delta x_{mp}((n+1)T) \right|, \left| \Delta x_C((n+1)T) \right| \right\} \Rightarrow$$

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_{np}((n+1)T) \right| \Rightarrow A_{np} \Rightarrow U_{opt}(nT) = U_{np}(nT),$$

$$\Rightarrow \Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_{mp}((n+1)T) \right| \Rightarrow A_{mp} \Rightarrow U_{opt}(nT) = U_{mp}(nT),$$

$$\Delta x_{\min}((n+1)T) = \left| \Delta x_C((n+1)T) \right| \Rightarrow A_C \Rightarrow U_{opt}(nT) = U_C(nT).$$

Моделирование оптимального цифрового ПИД регулирования

Метод оптимального цифрового регулирования поддерживается программой реализации унифицированных алгорит-

мов наилучшего цифрового регулирования (рис. 3) [1].

Основные результаты:

1) предложен метод оптимального цифрового регулирования на основе моделей ПИД регулятора, отличающийся формиро-

ванием наилучшего управляющего воздействия в такте превентивной оценки реакции объекта управления;

2) предложен алгоритм регулирования на базе построения параллельных вычислений управляющих воздействий и оценки динамики изменения регулируемого параметра по каждому процессу, отличающийся совместным использованием традиционных алгоритмов регулирования с учётом возможности применения алгоритмов смешанного регулирования на каждом шаге обработки регулируемого параметра.

Исследование выполнено при поддержке ФГБОУ ВО «ПГУ» 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 программы для ЭВМ № 2015616512. 2015.
2. Захарова О.В. Формула ПИД-регулятора для АЛУ непосредственного формирования // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 11–25.
3. Захарова О.В. Новая алгоритмическая модель для традиционного подхода цифрового регулирования // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8, часть 2. – С. 274–280. – Режим доступа: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10008153.
4. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13. No. 4. – P. 559–576.
5. Åström K.J. Hägglund T. Advanced PID Control. NC: ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2005. – 460 p.
6. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London: Imperial College Press, 2009. 3rd ed. 624 p.