

## ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов

Томский политехнический университет

E-mail: alex79@phtd.tpu.edu.ru

Рассматриваются недостатки стандартного регулятора системы автоматического управления с исполнительным механизмом постоянной скорости и искажения, вносимые им при реализации типового закона регулирования, влияние нелинейностей на качество регулирования. Предлагается новая реализация цифрового регулятора, обеспечивающего аппроксимацию типового закона регулирования с высокой точностью в широком диапазоне изменения параметров.

В системах автоматического регулирования (САР) с исполнительными механизмами (ИМ) постоянной скорости, построенных на основе микропроцессорных систем, для реализации пропорционально-интегрально-дифференциального закона (ПИД-закона) регулирования зачастую используется пропорциональное-дифференциальное-дважды дифференциальное-звено (ПДД<sup>2</sup>-звено) и программный или аппаратный широтно-импульсный модулятор (ШИМ) [1]. В большинстве случаев данная система не позволяет обеспечить требуемого качества регулирования и существенно повышает износ ИМ. В этой связи актуален поиск способов улучшения качества регулирования и снижения износа ИМ.

Структура регулятора на основе ПДД<sup>2</sup>-звена представлена на рис. 1, где 1 – ПДД<sup>2</sup>-звено, 2 – широтно-импульсный модулятор, 3 – исполнительный механизм постоянной скорости,  $\Delta t$  – длительность импульсов ШИМ,  $Z_n$  – импульсы ШИМ,  $\varepsilon$  – отклонение,  $\mu$  – регулирующее воздействие ИМ.

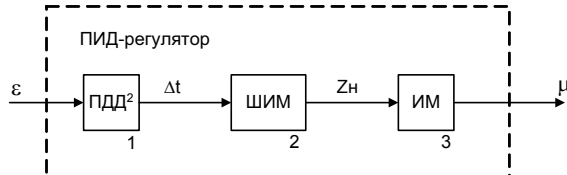


Рис. 1. Структурная схема цифрового ПИД-регулятора с ИМ постоянной скорости

Для реализации ПИД-закона регулирования в ПДД<sup>2</sup>-звено с передаточной функцией

$$W_{\text{пдд}}(p) = K^{\text{пдд}} + K^{\text{пдд}} T_{\text{дд}}^{\text{пдд}} p + K^{\text{пдд}} (T_{\text{дд}}^{\text{пдд}})^2 p^2, \quad (1)$$

где  $K^{\text{пдд}}$  – пропорциональный коэффициент,  $T_{\text{дд}}^{\text{пдд}}$  – постоянная времени дифференцирования,  $T_{\text{дд}}^{\text{пдд}}$  – постоянная времени двойного дифференцирования ПДД<sup>2</sup>-звена, вводятся параметры:

$$K^{\text{пдд}} = \frac{k_p T_{\text{им}}^{\text{пх}}}{T_u}, T_{\text{дд}}^{\text{пдд}} = T_u, (T_{\text{дд}}^{\text{пдд}})^2 = T_u T_{\text{дд}},$$

где  $k_p$  – пропорциональный коэффициент ПИД-закона,  $T_{\text{им}}^{\text{пх}}$  – время полного хода исполнительного механизма, с,  $T_u$ ,  $T_{\text{дд}}$  – постоянная времени интегрирования и дифференцирования, с. Звено ПДД<sup>2</sup> с выходом на ШИМ осуществляется с помощью рекуррентного соотношения [2] для реализации ПИД-закона совместно с ИМ:

$$\Delta t_i = \frac{T_c}{100} \left[ K^{\text{пдд}} \varepsilon_i + K^{\text{пдд}} T_{\text{дд}}^{\text{пдд}} \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{T_c} + K^{\text{пдд}} (T_{\text{дд}}^{\text{пдд}})^2 \frac{(\varepsilon_i - 2\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i-2})}{T_c^2} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta t_i$  – длительность импульса ШИМ в текущем цикле регулятора, с;  $T_c$  – длительность цикла регулятора (равное периоду ШИМ), с;  $\varepsilon_i$  – отклонение регулируемой величины в текущем цикле регулятора, %. Выражение (2) можно свести к виду:

$$\Delta t_i = \frac{T_{\text{им}}^{\text{пх}}}{100} \left[ k_p (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) + \frac{k_p T_c}{T_u} \varepsilon_i + \frac{k_p T_{\text{дд}}}{T_c} (\varepsilon_i - 2\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i-2}) \right]. \quad (3)$$

Это выражение описывает ПИД-регулятор в приращениях [3], где первое слагаемое – приращение пропорциональной составляющей, второе – интегральной, третье – дифференциальной. При этом в выражениях (2) и (3) на длительность импульса накладываются следующие ограничения

$$|\Delta t_i| \leq T_c, \quad |\Delta t_i| \geq \Delta t_{\text{имп}}^{\text{мин}},$$

где  $\Delta t_{\text{имп}}^{\text{мин}}$  – минимальная длительность импульса ШИМ, с, определяемая свойствами ИМ и его устройства управления [4].

Основные недостатки стандартного ПИД-регулятора построенного на основе ПДД<sup>2</sup>-звена, ШИМ и ИМ:

1. Ограничение приращения выходной величины (регулирующего воздействия ИМ) ПИД-регулятора длительностью цикла на уровне:

$$\Delta \mu_{\text{макс}} = \frac{100 T_c}{T_{\text{им}}^{\text{пх}}},$$

где  $\Delta \mu_{\text{макс}}$  – максимальное приращение регулирующего воздействия ИМ – выхода регулятора, %. Например, в случае, когда длительность цикла  $T_c = 3$  с, а время полного хода  $T_{\text{им}}^{\text{пх}} = 50$  с, максимальное приращение составляет 6 %.

2. Большая погрешность реализации интегральной составляющей. В стандартном регуляторе приращение интегральной составляющей (3), рассчитываемое за счёт пропорциональной составляющей

шей ПДД<sup>2</sup>-звена (1), вычисляется методом правых прямоугольников [5]:

$$\Delta t_i^{int} = \frac{T_{um}^{nx}}{100} \Delta I = \frac{T_{um}^{nx}}{100} \frac{k_p T_c}{T_u} \varepsilon_i.$$

Однако методы левых и правых прямоугольников имеют самую высокую погрешность среди численных методов [6].

3. Отключение интегральной составляющей при следующих отклонениях  $\varepsilon$  и параметрах ПИД-закона регулирования:

$$|\varepsilon| < \frac{100 \Delta t_{um}^{min} T_u}{T_{um}^{nx} k_p T_c}. \quad (4)$$

При выполнении соотношения (4) приращение интегральной составляющей в законе регулирования не происходит. Причём данная нелинейность сильно зависит от параметров регулятора. На примере ПИ-регулятора с параметрами:

$$k_p=0,3; T_u=300 \text{ с}; T_c=5 \text{ с}; \Delta t_{um}^{min}=0,1 \text{ с}; T_{um}^{nx}=50 \text{ с} \quad (5)$$

отключение интегральной составляющей происходит при  $|\varepsilon| < 40\%$ . В свою очередь, чувствительность любого регулятора с выходом на ШИМ и ИМ постоянной скорости определяется выражением

$$\delta = \frac{100 \Delta t_{um}^{min}}{T_{um}^{nx}}, \%$$

Для параметров (5) чувствительность регулятора может достигать 0,2 %.

4. Проявление дифференцирующих свойств при реализации пропорциональной составляющей в режиме насыщения  $|k_p \varepsilon| < 100\%$ . Данный эффект отражён на рис. 2, где 1 – отклонение регулируемой величины, 2 – выход аналогового пропорционального регулятора (П-регулятора), 3 – выход импульсного П-регулятора, 4 – импульсы ШИМ. Дифференцирующие свойства вызваны тем, что пропорциональная составляющая ПИД-закона (3) реализуется за счёт дифференциальной составляющей ПДД<sup>2</sup>-звена (1):

$$\Delta t_i^{np} = \frac{T_c}{100} K^{ndd} T_o^{ndd} \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{T_c} = \frac{T_{um}^{nx}}{100} k_p (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}).$$

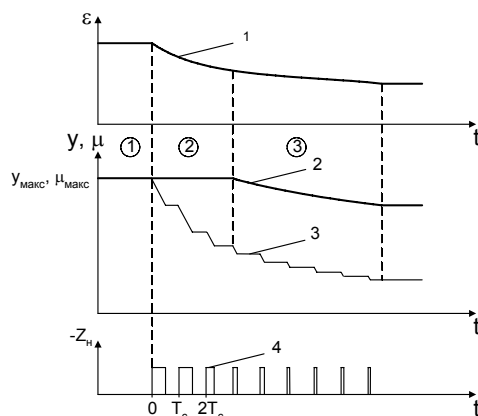


Рис. 2. Проявление дифференцирующих свойств импульсного П-регулятора на основе ПДД<sup>2</sup>-звена

Например, если  $k_p \varepsilon > 100\%$ , и  $\varepsilon$  уменьшается (рис. 2, интервал 2), то появляется отрицательное приращение пропорциональной составляющей, которое приводит к перемещению регулирующего органа (РО), что недопустимо для ПИ-регулятора.

5. Влияние дифференциальной составляющей закона регулирования на пропорциональную составляющую в режиме ограничения приращения выхода регулятора. Данный эффект возможен при:

$$|\varepsilon| \geq \frac{100}{T_{um}^{nx}} \frac{T_c^2}{k_p (T_c + T_o)}, \quad (6)$$

и представлен на рис. 3, где 1 – отклонение регулируемой величины, 2 – импульсы ШИМ для регулятора с длительностью цикла  $T_c$ , 3 – импульсы ШИМ для регулятора с длительностью цикла  $T_c^*$ , 4 – воздействие ИМ для регулятора с длительностью цикла  $T_c^*$ , 5 – воздействие ИМ для регулятора с длительностью цикла  $T_c$ . Причём для регулятора с длительностью цикла  $T_c^*$  ограничения приращения регулирующего воздействия не происходит. При положительном импульсном воздействии на регулятор, при выполнении (6), РО сначала откроется на  $\Delta \mu_{max}$ , а в следующем цикле закроется на  $\Delta \mu_{max}$  после чего будет происходить приращение выхода за счёт интегральной составляющей (рис. 3, кривая 5). Однако, в данном случае, пропорциональная составляющая закона регулирования отсутствует.

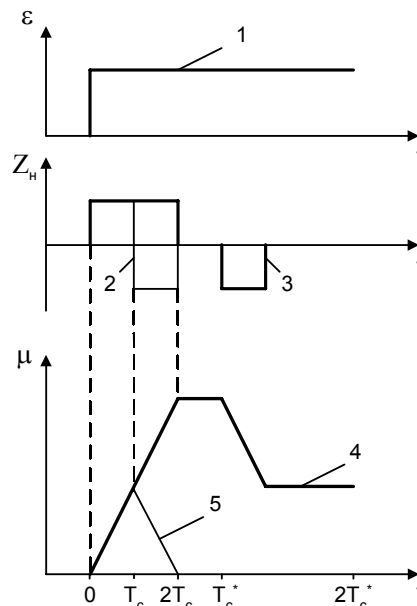


Рис. 3. Влияние дифференциальной составляющей на пропорциональную составляющую закона регулирования

По результатам анализа поведения САР с разными регуляторами, разработан алгоритм цифрового регулятора с коррекцией нелинейностей (ЦРК) с выходом на ШИМ, который совместно с ИМ формирует закон, максимально приближенный к ПИД-закону регулирования. В данном алгоритме устранены недостатки стандартных регуляторов на основе ПДД<sup>2</sup>-звена. В ЦРК первый недостаток устранён за счёт введения в регулятор корректора дли-

тельности управляющего импульса, текущего такта регулирования в зависимости от оставшейся после ограничения длительности импульса предыдущего такта регулирования. Второй недостаток устранён за счёт реализации интегральной составляющей методом трапеций. Третий недостаток исключён за счёт введения в регулятор алгоритма коррекции, который рассчитывает период ШИМ

$$T = i \cdot T_c, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

и длительность импульса

$$\Delta t_i^* = \sum_i \Delta t_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

в режиме  $|\Delta t| < \Delta t_{\text{имп}}^{\text{мин}}$ . Четвёртый и пятый недостатки устранены за счёт введения дополнительных блокировок (ограничений) на пропорциональную и дифференциальную составляющие.

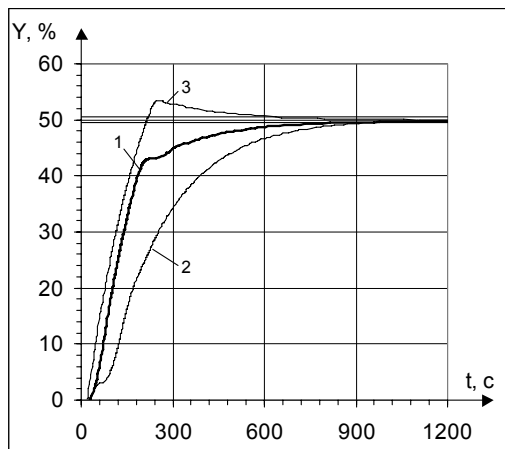


Рис. 4. Переходные процессы по управлению

Методом имитационного моделирования произведено сравнительное исследование качества регулирования в САР с ИМ постоянной скорости построенных на основе релейно-импульсного регулятора [4], ПДД²-звена (ПДД²-ШИМ-регулятор) и ЦРК (ЦРК-ШИМ-регулятор), а также линейной САР с пропорциональным ИМ. На рис. 4 представлен пример переходного процесса по управлению для технологического объекта (ТОУ) с передаточной функцией:

$$W_{об}^u(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{0,8}{200 p + 1} e^{-20p},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК-ШИМ-регулятором, 2 – САР с ПДД²-ШИМ-регулятором, 3 – САР с аналоговым ПИД-регулятором, Y – выход ТОУ. Данный пример показывает, что недостатки (а именно, 1 и 5 недостатки) стандартного регулятора ПДД²-ШИМ существенно ухудшают показатели качества переходного процесса по управлению (кривая 2), отдаляют систему от линейной (кривая 3). При этом управляющее воздействие (кривая 2) ПДД²-ШИМ-регулятора (рис. 5) не соответствует ПИД-закону.

На рис. 6 представлен переходный процесс по возмущению для ТОУ с передаточной функцией:

$$W_{об}^u(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{1,2}{50 p + 1},$$

$$W_{об}^f(p) = \frac{K_o^f}{T_o^f p + 1} e^{-\tau_o^f p} = \frac{1,2}{25 p + 1},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК, 2 – САР с ПДД²-ШИМ, F – возмущение. В данном случае САР с ПДД²-ШИМ-регулятором (кривая 2) не обеспечивает требуемой точности регулирования, что вызвано вторым недостатком.

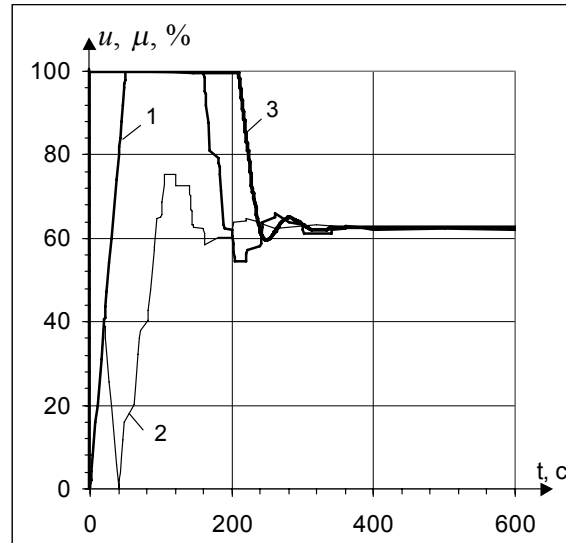


Рис. 5. Управляющие воздействия регуляторов

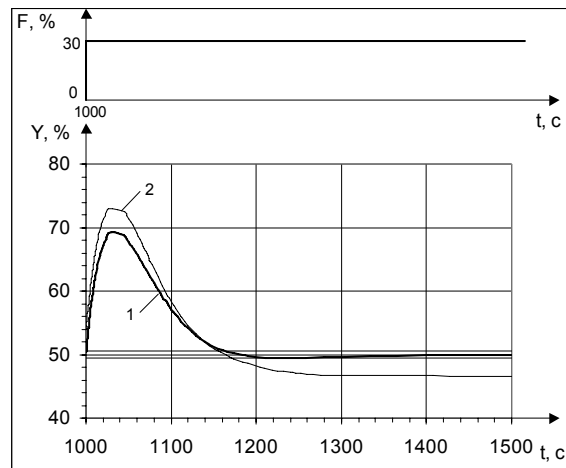


Рис. 6. Переходные процессы по возмущению

На рис. 7 показан пример другого переходного процесса по возмущению для ТОУ с передаточной функцией:

$$W_{об}^u(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{10}{2 p + 1} e^{-0,5p},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК, 2 – САР с ПДД²-ШИМ. В данных САР цикл регулятора превышает постоянную времени ТОУ и составляет 5 с.

Рис. 7 показывает, что САР с ПДД<sup>2</sup>-ШИМ-регулятором (кривая 2) обеспечивает существенно худший переходный процесс по сравнению с системой на основе ЦРК (кривая 1), что вызвано вторым недостатком (высокой погрешностью реализации интегральной составляющей в ПДД<sup>2</sup>-ШИМ).

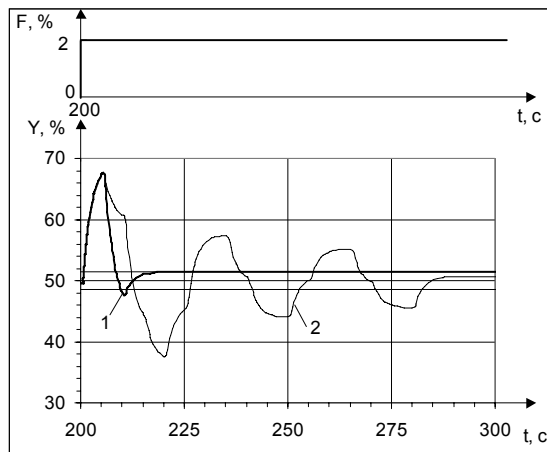


Рис. 7. Переходные процессы по возмущению

Уменьшение цикла регулирования с целью уменьшения погрешности реализации интегральной составляющей приводит к увеличению статической ошибки регулирования, как это показано на рис. 8 (кривая 2).

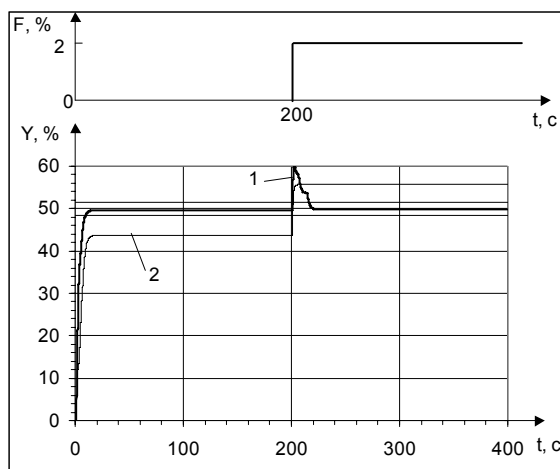


Рис. 8. Переходные процессы по управлению и возмущению

В свою очередь, компенсация статической ошибки за счёт увеличения коэффициента передачи и уменьшения постоянной времени интегрирования приводит к неустойчивой САР, как представ-

лено на рис. 9 (кривая 2). При этом уменьшение цикла регулирования в САР с ЦРК приводит, наоборот, к улучшению показателей качества (рис. 8, 9, кривая 1).

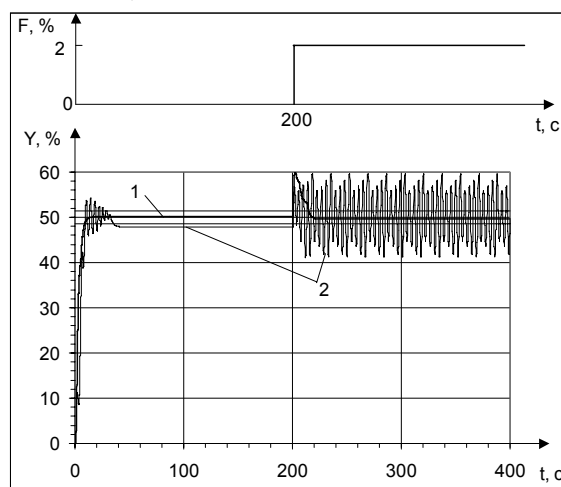


Рис. 9. Переходные процессы по управлению и возмущению

Из результатов моделирования следует, что недостатки стандартного ПДД<sup>2</sup>-ШИМ-регулятора существенно ухудшают показатели качества регулирования. Экспериментально подтверждено, что ПДД<sup>2</sup>-ШИМ удовлетворительно аппроксимирует ПИД-закон в очень узкой области параметров, обеспечивая приемлемое качество регулирования, в остальных же случаях качество регулирования неудовлетворительное. В большинстве случаев попытки улучшить качество перебором параметров не дают положительного результата. В свою очередь, в разработанном ЦРК эти недостатки устранены, качество регулирования и переходные процессы максимально приближены к САР с аналоговым ПИД-регулятором.

Таким образом, в системах, имеющих сложные объекты управления с повышенными требованиями к качеству регулирования, применение регулятора на основе ПДД<sup>2</sup>-звена, ШИМ и ИМ недопустимо. Новая реализация цифрового регулятора с ШИМ, обеспечивающего аппроксимацию ПИД-закона с высокой точностью в широком диапазоне изменения параметров, позволяет существенно улучшить качество регулирования в САР с ИМ постоянной скорости, уменьшить износ ИМ и существенно расширить область применения данных ИМ в микропроцессорных автоматизированных системах управления технологическими процессами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андык В.С., Рязанов В.И. Применение микропроцессорных контроллеров в управлении теплоэнергетическими процессами. Учебное пособие. — Томск: ТПИ, 1988. — 60 с.
2. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. — СПб.: Невский Диалект, 2001. — 470 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
4. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие / Под ред. А.С. Ключева, А.Т. Лебедева, С.А. Ключева, А.Г. Товарнова. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 368 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Мир, 1970. — 720 с.
6. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. — Томск: МП "РАСКО", 1991. — 270 с.