

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОГО МОДУЛЯ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

КУЗЬМИН Константин Анатольевич, МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

МОРОЗОВ Сергей Михайлович, МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

БАЛМАШНОВА Елена Витальевна, НИУ МГСУ

ЗУЕВА Диана Дмитриевна, НИУ МГСУ

В промышленных системах управления широко используются трехканальные ПИД-регуляторы. Отмечается, что популярность использования ПИД-регуляторов в управлении производственными процессами объясняется их способностью обеспечить высокое качество ведения процессов в широком диапазоне режимов, а также функциональной простотой, позволяющей инженерам эксплуатировать их без каких-либо проблем.

Введение. Если задан объект управления, то подлежат определению три параметра ПИД-регулятора: коэффициент пропорциональности; коэффициент при интеграле; коэффициент при производной.

Аналоговый непрерывный ПИД-регулятор имеет передаточную функцию [1, 2]:

$$W(s) = K_1 + \frac{K_2}{s} + K_3 s, \quad (1)$$

где K_1, K_2, K_3 – настроочные параметры.

Во временной области выходная $u(t)$ и входная $e(t)$ переменные регулятора связаны уравнением (2):

$$u(t) = K_1 e(t) + K_2 \int e(t) dt + K_3 \frac{de(t)}{dt}. \quad (2)$$

Выходной сигнал ПИД-регулятора равен сумме составляющих: пропорционального входному сигналу, его интегралу и производной [3].

Если положить $K_3 = 0$, то получим пропорционально-интегральный, или ПИ-регулятор:

$$W(s) = K_1 + \frac{K_2}{s}. \quad (3)$$

В случае $K_2 = 0$ будет получен пропорционально-дифференциальный, или ПД-регулятор:

$$W(s) = K_1 + K_3 s. \quad (4)$$

В цифровых системах управления вычислительное устройство по определенной программе обрабатывает представленную в цифровой дискретной форме входную информацию и выдает на выходе сигнал также в цифровой дискретной форме [6].

Преобразование непрерывного сигнала в цифровую форму осуществляется аналогово-цифровой преобразователь АЦП [4].

Выходной сигнал компьютера (цифровой, дискретный) преобразуется в непрерывную (квазинепрерывную) форму с помощью цифро-аналогового преобразователя ЦАП.

Структурная схема системы управления с цифровым регулятором показана на рис. 1.

Система представлена в виде двух подсистем (частей): дискретной и непрерывной. В процессе моделирования непрерывную часть системы представляют в дискретной Z-форме [5]. В среде VisSim это возможно, если система линейная.

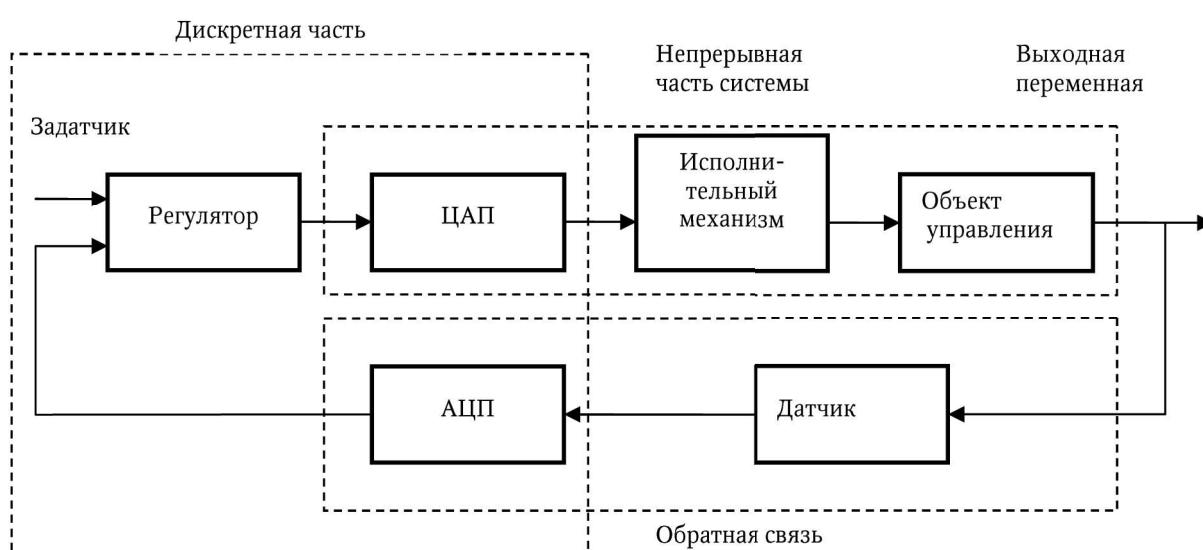


Рис. 1. Структурная схема системы управления



Если в системе имеется хотя бы одно нелинейное звено, Z-преобразование становится невозможным, хотя алгоритмическая схема в передаточных функциях по Лапласу нормально функционирует, если в схему введено это нелинейное звено, то возможно осуществить линеаризацию Z-преобразования в окрестности рабочей точки, но модель становится слишком приближённой и неадекватно описывает реальный технологический процесс. Говорить о рабочей точке можно в случае, когда САУ является стабилизирующей. Если выходная координата объекта управления должна изменяться по определённому закону (алгоритму), то линеаризация в этом случае не имеет смысла.

Получается замкнутый круг. Решением этой проблемы может быть разработка гибридной модели системы, в которой математическая модель регулятора – дискретная цифровая, а математическая модель непрерывной части – аналоговая (передаточные функции звеньев по Лапласу).

Связующим звеном между этими частями системы является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Целью является разработка модели автономного блока – модуля, включающего в себя цифровой дискретный ПИД-регулятор и цифроанalogовый преобразователь ЦАП в среде моделирования VisSim [7].

При таком подходе уместно вообще отказаться от использования дискретного Z-преобразования, построить модель ПИД-регулятора, производящего вычисление по алгоритму (1), а модель ЦАП построить на основе блока – сумматора с обратной связью.

Представленный в работе автономный модуль (ПИД-регулятор + ЦАП) может быть использован инженерами-разработчиками при проектировании цифровых систем автоматического управления аналоговыми непрерывными объектами, включая линейные и нелинейные звенья, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов в области систем управления.

Методика исследований. Представление ПИД-регулятора в цифровой дискретной форме можно получить из выражения (2), используя дискретную аппроксимацию операций дифференцирования и

интегрирования. Для производной по времени воспользуемся правилом правой разности:

$$u(k\Delta t) = \frac{de}{dt} \Big|_{t=k\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \{e[k\Delta t] - e[(k-1)\Delta t]\}, \quad (5)$$

где Δt – период квантования во времени; k – номер такта импульса задающего генератора ($0, 1, 2 \dots$).

Применив к (5) Z-преобразование, получим:

$$U(z) = \frac{(1-z^{-1})}{\Delta t} E(z) = \frac{z-1}{z\Delta t} E(z). \quad (6)$$

Операцию интегрирования аппроксимируем с помощью формулы прямоугольников:

$$u(k\Delta t) = u[(k-1)\Delta t] + \Delta t \cdot e(k\Delta t), \quad (7)$$

где $u(k\Delta t)$ – выход интегратора в момент $t = k\Delta t$. Применив к (7) Z-преобразование, получим:

$$U(z) = z^{-1} U(z) + \Delta t E(z), \text{ или } U(z) = \frac{\Delta t E(z)}{z-1}. \quad (8)$$

Таким образом, передаточная функция цифрового ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$G(z) = K_1 + K_2 \frac{\Delta t z}{z-1} + K_3 \frac{z-1}{\Delta t z}. \quad (9)$$

Применяя к (9) обратное Z-преобразование, получим разностное уравнение, описывающее алгоритм работы цифрового ПИД-регулятора.

$$\begin{aligned} u(k) = K_1 e(k) + K_2 [u(k-1) + \Delta t e(k)] + \\ + \frac{K_3}{\Delta t} [e(k) - e(k-1)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Вычисления по уравнению (10) реализованы в программной среде моделирования VisSim.

Результаты исследований. На рис. 2 представлена модель дискретного ПИД-регулятора, осуществляющего вычисления по алгоритму (10).

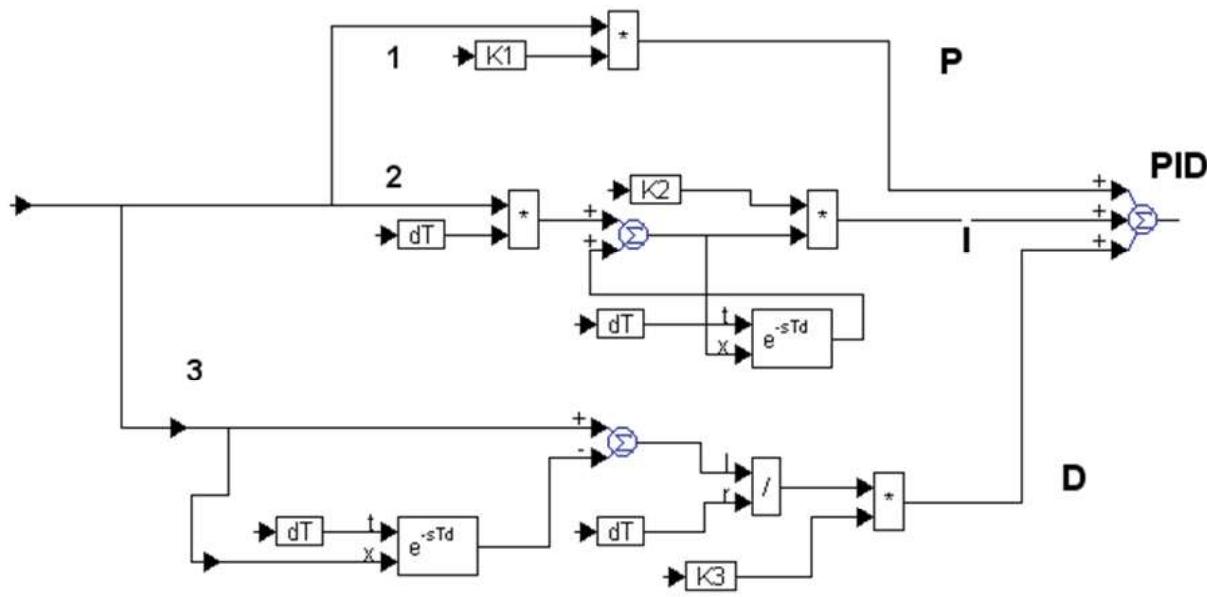


Рис. 2. Модель ПИД-регулятора

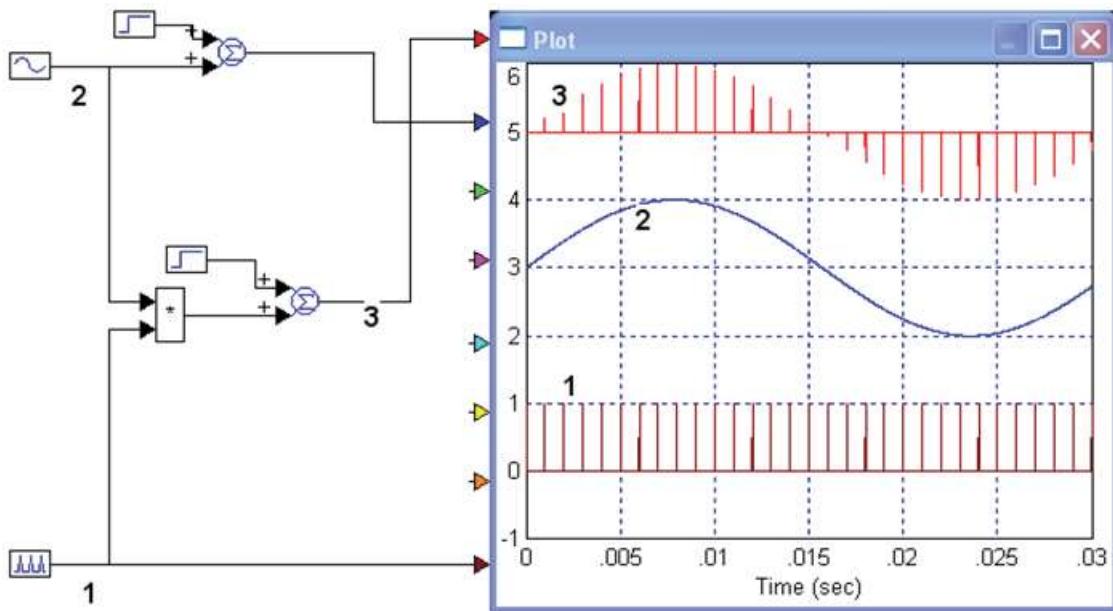


Рис. 3. Квантователь для формирования тестовых сигналов: 1 – генератор импульсного сигнала и сигнал; 2 – генератор синусоидального сигнала и сигнал; 3 – выходной дискретный модулированный сигнал

В первом канале происходит усиление входных дискретных сигналов в k_1 раз. Во втором канале реализуется интегральный закон преобразования входного сигнала в соответствии с выражением (7). Третий канал производит дифференцирование входного сигнала по алгоритму (5).

После суммирования на выходе реализуется ПИД-закон преобразования входного сигнала в выходной. Таким образом, данная модель ПИД-регулятора представляет собой цифровой дискретный фильтр [8].

Для проверки правильности работы представленной модели ПИД-регулятора необходимо провести тестирования каждого составляющего канала. Для этой цели в работе в качестве тестового сигнала предлагается использовать дискретный импульсный сигнал, амплитуда импульсов которого изменяется по гармоническому синусоидальному закону. Такой сигнал можно получить в среде VisSim, используя компоненты (блоки): генератор импульсных сигналов; аналоговый непрерывный сигнал – модулятор; умножитель.

Этот набор блоков позволяет смоделировать квантователь, близкий к идеальному.

Модель квантователя представлена на рис. 3.

Установим параметры генератора импульсных сигналов:

амплитуда импульсов: $A = 1$;

время между импульсами (период квантования): $dT = 0,001 \text{ с}$.

В качестве аналогового непрерывного модулирующего сигнала возьмем гармонический синусоидальный сигнал.

Принцип получения дискретного решетчатого сигнала понятен из рис. 2.

После перемножения сигналов 1 и 2 в блоке умножителя на выходе блока формируется дискретный решетчатый сигнал, который может быть использован для тестирования ПИД-регулятора.

Для удобства визуального наблюдения процесса тестирования установим на генераторе синусоидального генератора значение круговой частоты $\omega = 62,831853 \text{ с}^{-1}$. В таком случае, для точности проведения тестирования период колебания равен $T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,1 \text{ с}$

и время развертки сигнала на экране осциллографа можно задать кратным $T = 0,1 \text{ с}$.

Проведем тестирование составляющих каналов ПИД-регулятора. Модель ПИД-регулятора в среде VisSim представлена в виде блока PID.

Тестирование П-канала ПИД-регулятора регулятора.

Установим значения настроек параметров:

$K_1 = 5, K_2 = 0, K_3 = 0$.

Время симуляции (счета) $t = T = 0,1 \text{ с}$.

На рис. 4. представлен выходной сигнал, сформированный первым каналом (П-регулятором).

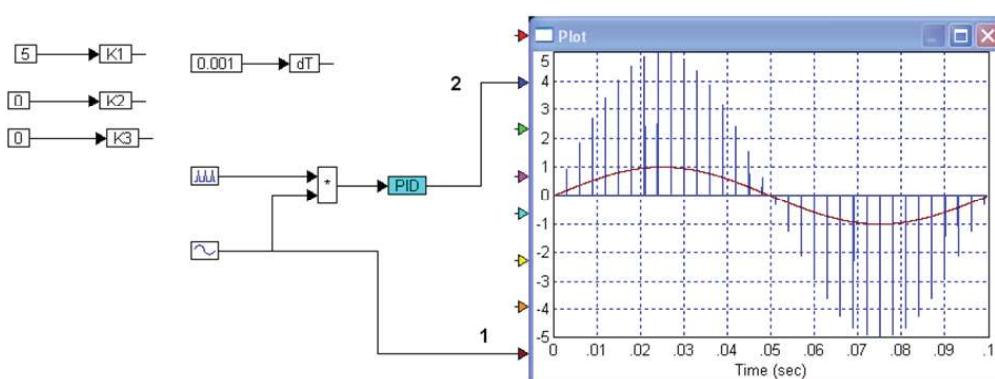


Рис. 4. Тестирование П-канала ПИД-регулятора



На осциллографе сплошной линией изображен входной модулирующий сигнал 1. Значения импульсов выходного дискретного сигнала 2 в $K_1 = 5$ больше значений входного сигнала в соответствующие дискретные моменты времени.

Тестирование И-канала ПИД-регулятора.

Установим значения настроек параметров:

$$K_1 = 0; K_2 = 31,5; K_3 = 0.$$

Время симуляции (счета) $t=T=0,1$ с.

На рис. 5 представлен выходной сигнал, сформированный вторым каналом (И-регулятором).

На осциллографе сплошной линией изображен входной модулирующий сигнал 1. Значения импульсов выходного дискретного сигнала 2 с точностью до постоянного коэффициента равны интегралу от входного в соответствующие моменты времени. Значение параметра K_2 , равное 31,5, подобрано для удобного сравнения входного и выходного сигналов. На осциллограмме значение выходного сигнала достигает максимума в момент времени $t = 0,05$ с при нулевом значении входного сигнала для этого момента времени. За полный период входного сигнала $T = 0,1$ с значение выходного сигнала становится равным 0, что соответствует интегральному закону преобразования фильтра.

Тестирование Д-канала ПИД-регулятора.

Установим значения настроек параметров:

$$K_1 = 0; K_2 = 0; K_3 = 1.$$

Время симуляции (счета) $t = T = 0,1$ с.

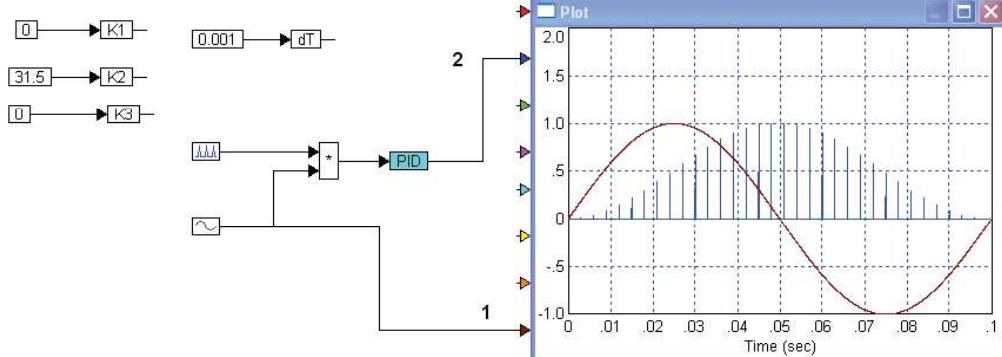


Рис. 5. Тестирование И-канала ПИД-регулятора

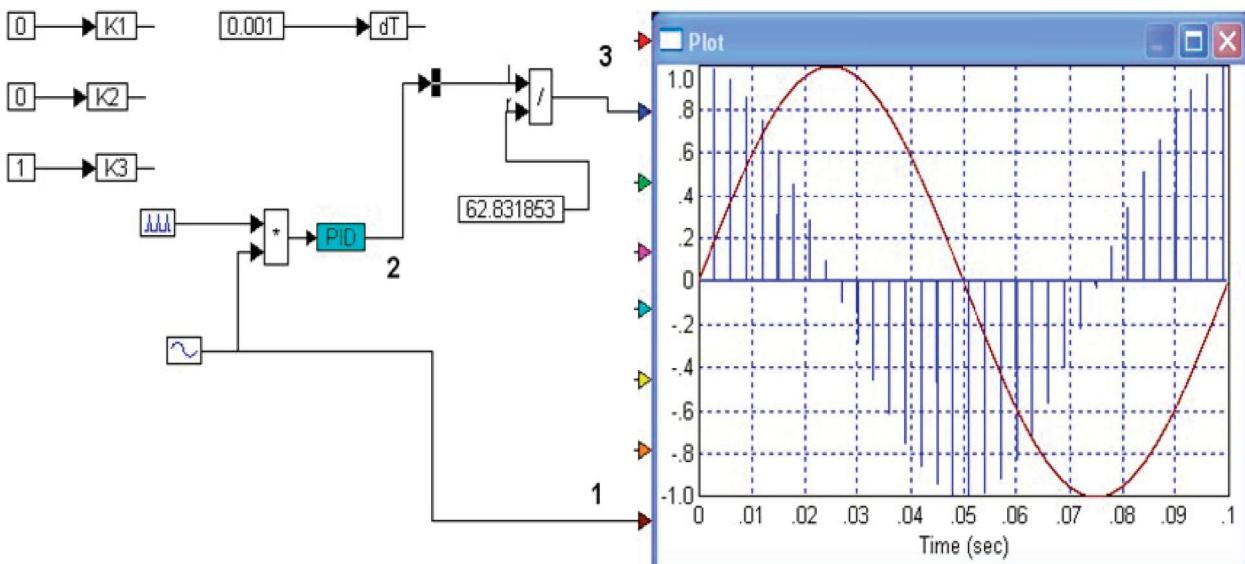


Рис. 6. Тестирование Д-канала ПИД-регулятора

На рис. 6 представлен выходной сигнал, сформированный третьим каналом (Д-регулятором), уменьшенный в $\omega = 62,831853$ раза.

На осциллографе сплошной линией изображен входной модулирующий сигнал 1. Так, как входной сигнал представляет собой зависимость $e(t) = \sin(\omega t)$ то выходной сигнал есть производная от входного $u(t) = \omega * \cos(\omega t)$.

Значения импульсов выходного дискретного сигнала 2 равны производной от входного сигнала, уменьшенный в $\omega = 62,831853$ раза для удобства визуального наблюдения.

На графиках видно, что выходной сигнал с точностью до постоянной ω равен производной от входного сигнала.

ПИД-закон преобразования входного сигнала.

Дискретный выходной сигнал ПИД-регулятора получен при настроенных параметрах: $K_1 = 2$; $K_2 = 0,01$; $K_3 = 0,01$.

Период квантования по времени задан 0,001 с.

Результаты тестирования ПИД-регулятора по трем каналам приводятся на рис. 7.

Из рисунка, в момент времени $t = 0$ с значение входного сигнала равно 0. В силу Д-канала ПИД-регулятора выходной сигнал (сигнал управления) отличен от 0. Все остальные каналы также участвуют в формировании выходного управляющего сигнала [9].

Заключение. В результате исследования в среде динамического программирования VisSim раз-



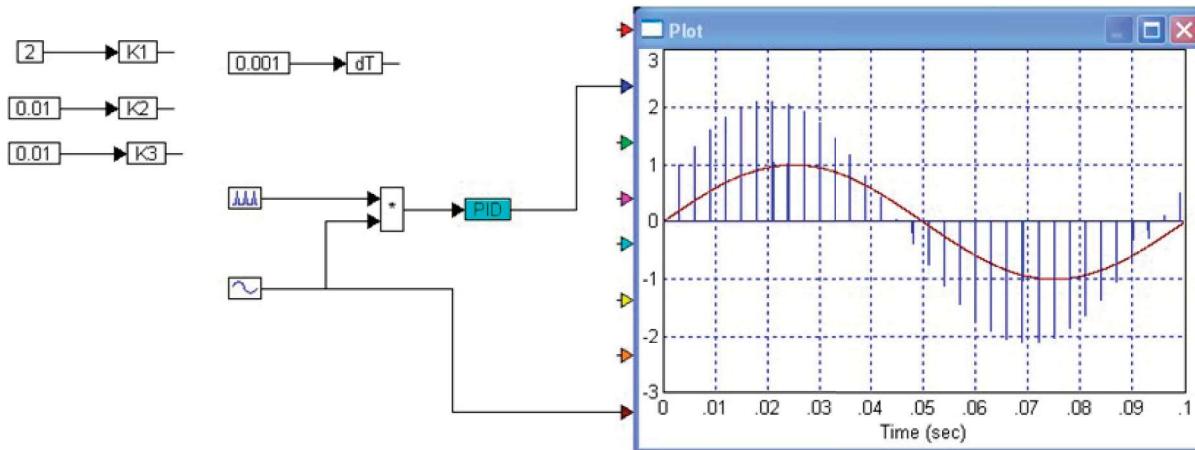


Рис. 7. Тестирование ПИД-регулятора по трем каналам

работана имитационная модель автономного модуля – дискретного цифрового ПИД-регулятора с цифро-аналоговым преобразователем и описаны процессы тестирования каналов ПИД-регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2017. – 747 с.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики: учебник-монография; пер. с англ. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2016. – 397 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник для вузов. Т.2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2016. – 440 с.
4. Прангисишили И.В., Амбарцумян А.А. Основы построения АСУ сложными технологическими процессами. – М.: Энергоатом-издат, 2015.
5. Зюбин В.Е. К десятилетию стандарта IEC 1131-3. Итоги и прогнозы // Приборы и системы управления. – 2015. – № 1.
6. Морозов С.М., Кузьмин К.А., Кочеткова Л.И., Балмашнова Е.В. Разработка исходных концепций метрологического обеспечения измерительных и расчетных операций при автоматизации измерений // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 87–89.
7. Кузьмин К.А., Морозов С.М. Определение оптимальных режимов работы СВЧ-установки для сушки и обжига строительного кирпича // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – С. 75.
8. Morozov S., Kuzmin K., Makarov G. Neural network principle of implementation of digital filters // MATEC Web of Conferences (см. в книгах), 2018, No. 193, P. 102.

9. Morozov S., Kuzmin K., Pogodin D., Kochetkova L., Rogozhina A. Modeling of the management of the microwave grain drying process // E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019, P. 02142.

Кузьмин Константин Анатольевич, канд. пед. наук, доцент кафедры «Естественно-научные технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия.

Морозов Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Естественно-научные технические дисциплины и информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет). Россия. 215100, Смоленская обл., г. Вязьма, ул. Ленина, 77.

Тел.: (48131) 6-18-66.

Балмашнова Елена Витальевна, преподаватель кафедры «Технология и организация строительного производства», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

Зуева Диана Дмитриевна, магистрант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Тел.: +7 (495) 781-80-07.

Ключевые слова: ПИД-регуляторы; аналоговый; передаточная функция; пропорционально-интегральный; пропорционально-дифференциальный; цифро-аналоговый преобразователь; структурная схема системы управления.

SIMULATION MODEL OF AUTONOMOUS MODULE OF DIGITAL PID CONTROLLER

Kuzmin Konstantin Anatolyevich, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the chair "Science and Technical Disciplines and Information Technology", K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University). Russia.

Morozov Sergey Mikhaylovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair "Science and Technical Disciplines and Information Technology", K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University). Russia.

Balmashnova Elena Vitalyevna, Teacher of the chair "Technology and Organization of Construction Production", National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia.

Zueva Diana Dmitrievna, Magistrant, National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia.

Keywords: PID controllers; analog; transmission function; proportional-integral; proportional-differential; digital-to-analog converter; block diagram of the control system.

Three-channel PID controllers are widely used in industrial control systems. It is noted that the popularity of PID controllers in the control of industrial processes is explained by their ability to ensure high quality of processes in a wide range of modes, as well as functional simplicity that allows engineers to operate them without any problems.

